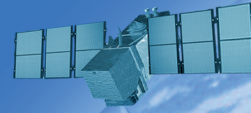


[Cilt/Volume:12] [Sayı/Issue:01] [Mayıs/May 2025] [Dergi No/Journal No.:121] [ISSN: 2147-1339] [e-ISSN: 2667-8519]

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON DERGİSİ

JOURNAL OF
GEODESY AND GEOINFORMATION



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

UCTEA Chamber of Survey and Cadastre Engineers



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

Yayıncı / Publisher

TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası
UCTEA Chamber of Surveying and Cadastre Engineers, Turkey

Yayın İdare Merkezi / Head Office

Mustafa Kemal Mahallesi 2129 Sk. No:1/7-8-9 06530 Çankaya, ANKARA, TURKEY
Tel: + 90 (312) 2325777 • Fax: + 90 (312) 2308574
jjd@hkmo.org.tr ; hkmojjd@gmail.com
dergipark.org.tr/hkmojjd

Tasarım ve Mizanpaj / Design & Layout

Önder Olgun Bökü
Tel: +90 532 694 72 80 E-Posta: info@boyutmatbaa.com

Baskı & Cilt / Printing & Binding

OnAda Tanim Bas. Prom. San ve Tic. Ltd. Sti.
Bayraktar Mh. Bayraklı Sk. 28/2 Çankaya / ANKARA
T: +90 (533) 573 36 79
B. Yeri: Girişim Matbaacılık (47852)

Basım Tarihi /Publication Date: Mayıs 2025 / May 2025

Baskı Adedi /Circulation: 2000

Hakemli bir dergidir. / A Peer - reviewed journal.

Yaygın ve süreli yayındır. / A widely distributed periodical.

Yılda iki defa yayımlanır (Mayıs - Kasım) / Published semiannually (May - November).

[Cilt/Volume:12] [Sayı/Issue:01] [Mayıs/May 2025] [Dergi No/Journal No.:121]

[ISSN: 2147-1339] [e-ISSN: 2667-8519]

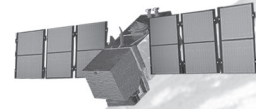


UCTEA

Chamber of Survey and Cadastre Engineers

JEODEZİ VE JEOİFORMASYON DERGİSİ

JOURNAL OF
GEODESY AND GEOINFORMATION



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

UCTEA Chamber of Survey and Cadastre Engineers

JEODEZİ VE JOURNAL OF GEODESY

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul

EDİTÖR YARDIMCILARI / CO-EDITORS

Prof. Dr. Tanık TÜRK
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Sivas

Prof. Dr. Nursu TUNALIOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul

EDİTÖR KURULU / EDITORIAL BOARD

Prof.Dr.Ahmet Özgür DOĞRU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Ali Melih BAŞARANER
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Prof.Dr.Atıncı PIRTI
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Aydın ÜSTÜN
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
Prof.Dr.Ayşe YAVUZ ÖZALP
Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin
Prof.Dr.Cemal Özer YİĞİT
Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Prof.Dr.Cengizhan İPBÜKER
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Çetin CÖMERT
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
Prof.Dr.Çetin MEKİK
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
Prof.Dr.Devrim AKÇA
Işık Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Ekrem TUŞAT
Konya Teknik Üniversitesi, Konya
Prof.Dr.Emine Tanır KAYIKÇI
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
Prof.Dr.Erol KÖKTÜRK
Okan Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Faik Ahmet SESLİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun
Prof.Dr.Ferit YILDIZ
Konya Teknik Üniversitesi, Konya
Prof.Dr.Halil AKINCI
Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin
Prof.Dr.Haluk ÖZENER
Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

Prof.Dr.Haluk KONAK
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
Prof.Dr.Hülya DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Hüseyin TOPAN
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak
Prof.Dr.İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ
Konya Teknik Üniversitesi, Konya
Prof.Dr.İsmail Rakıp KARAŞ
Karabük Üniversitesi, Karabük
Prof.Dr.Mahmut Onur KARSLIOĞLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
Prof.Dr.Metin SOYCAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Mualla YALÇINKAYA
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
Prof.Dr.Murat UYSAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
Prof.Dr.Mustafa TÜRKER
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
Prof.Dr.Naci YASTIKLI
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Nebiye MUSAOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Necla ULUĞTEKİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Oğuz GÜNGÖR
Ankara Üniversitesi, Ankara
Prof.Dr.Özgün AKÇAY
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale
Prof.Dr.Rahmi Nurhan ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Saygın ABDİKAN
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
Prof.Dr.Sebahattin BEKTAŞ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun

Prof.Dr.Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
Prof.Dr.Süleyman Savaş DURDURAN
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya
Prof.Dr.Şenol Hakan KUTOĞLU
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak
Prof.Dr.Taşkın KAVZOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Prof.Dr.Taylan ÖCALAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Prof.Dr.Uğur AVDAN
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir
Prof.Dr.Uğur DOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Doç.Dr.Alper ŞEN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Doç.Dr.Caner GÜNEY
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Doç.Dr.Melis UZAR
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
Doç.Dr.M.Tevfik ÖZLÜDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Doç.Dr. Muzaffer Can İBAN
Mersin Üniversitesi, Mersin
Doç.Dr. Nusret DEMİR
Akdeniz Üniversitesi, Antalya
Doç.Dr.Utkan Mustafa DURDAĞ
Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin
Doç.Dr.Zeynel Abidin POLAT
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir
Dr.Öğr.Üyesi Ali Hasan DOĞAN
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat
Dr.Öğr.Üyesi Emin Özgür AVŞAR
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale
Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Güven KOÇAK
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir

SAHİBİ (HKMO adına)
OWNER (on behalf of CSCE)
Ali İPEK
HKMO, Ankara

YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ
MANAGING EDITOR
Timur Bilinç BATUR
HKMO, Ankara

YAYIN KURULU / PUBLICATION BOARD

Bahattin ERDOĞAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Nursu TUNALIOĞLU, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Tarık TÜRK, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas

Taylan ÖCALAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Onur SEVENCAN, HKMO, Ankara

JEOİNFORMASYON DERGİSİ AND GEOINFORMATION

Dergi Hakkında

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası'na ait altı ayda bir yayımlanan (Mayıs ve Kasım ayları), hakemli, açık erişimli, süreli, özgün makalelerin yer aldığı bilimsel bir dergidir. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 2019 yılından itibaren ULAKBİM TR DİZİN'de yer almaktadır.

Amaç ve Kapsam

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, jeodezi, jeoinformasyon bilimleri ve teknolojileri konularında geniş kapsamlı araştırma alanlarını içermektedir. Geleneksel çalışma alanlarının yanında, yer bilimleri, yere yönelik uzay bilimleri ve ilişkili disiplinler arası çalışmalara da dergide yer verilmektedir.

Dergide en az iki bilim insanı veya araştırmacı tarafından hakem değerlendirmesinden geçmiş, aşağıda listelenen alanlarda Türkçe veya İngilizce makaleler yayımlanmaktadır.

- Ölçme ve Algılama Sistemleri
- Matematiksel, Fiziksel, Uzay ve Mühendislik Jeodezisi
- Yer Bilimleri
- Uzaktan Algılama
- Fotogrametri
- Yere Yönelik Uzay Bilimleri
- Kartografya
- Coğrafi Bilgi Sistem ve Teknolojileri
- Arazi Yönetimi
- Yazılım Geliştirme

Makale Gönderme

Makale gönderme, değerlendirme ve düzenleme süreçleri <https://dergipark.org.tr/tr/pub/hkmojjd> sistemi üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Telif Hakkı Bildirimi

Jeodezi ve Jeoinformasyon dergisi ücretsiz ve açık erişimli bir dergidir. Uygun şekilde kaynak göstermek koşulu ile makalenin herhangi bir bölümünün araştırma, çalışma, ders veya bilimsel ve teknik dokümanlarda kullanımı ücretsizdir. Ticari amaçla kopyalanması ve kullanımı TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası'ndan alınacak özel izne tabidir.

Yayın Etiği

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi bünyesindeki tüm yayınlar için yayın etiğini en yüksek standartlarda uygulamayı amaçlar ve "The Committee on Publication Ethics (COPE)" tarafından ortaya konulan kural ve ilkelere uymayı taahhüt eder.

About the Journal

Journal of Geodesy and Geoinformation is a peer-reviewed, semiannual (May and November), open access journal, which covers original scientific manuscripts, published by UCTEA Chamber of Surveying and Cadastre Engineers, Turkey. The Journal of Geodesy and Geoinformation has been indexed in ULAKBİM TR DİZİN since 2019.

Aim and Scopes

Journal of Geodesy and Geoinformation covers a broad range of research topics in geodetic and geoinformation sciences and technologies. Besides the traditional areas, it also includes study fields concerned with the earth sciences, earth-oriented space sciences and related interdisciplinary subjects.

The journal publishes peer-reviewed papers in the fields listed below in both English and Turkish, which are reviewed by at least two scientists and researchers.

- Surveying and Sensoric
- Mathematical, Physical, Space and Engineering Geodesy
- Earth Sciences
- Remote Sensing
- Photogrammetry
- Earth Oriented Space Sciences
- Cartography
- Geographical Information Systems and Technologies
- Land Management
- Software Development

Submission of Manuscript

Manuscript submission, review and editing processes are available on <https://dergipark.org.tr/en/pub/hkmojjd>

Copyright Information

Journal of Geodesy and Geoinformation is an open access and free of charge journal. There is no charge for use of any part of this publication in research, study, teaching or republications in scientific and technical documents, but the materials must be cited appropriately. Use and reproduction for commercial purposes requires special permission from Chamber of Surveying and Cadastre Engineers.

Publication Ethics

Journal of Geodesy and Geoinformation aims to apply high quality ethical standards for all publications and commits to obey the rules and principles of "The Committee on Publication Ethics (COPE)".

İÇİNDEKİLER CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- Assessment of GNSS-IR performance using multi-GNSS and multi-frequency SNR data from smartphones
Akıllı telefonların çok frekanslı çoklu-GNSS SNR verilerinin GNSS-IR performansının değerlendirilmesi 1-19
Cemali ALTUNTAŞ, Nursu TUNALIOĞLU
- Ortalama kaydırma algoritması kullanarak küresel radyal tabanlı fonksiyonlar ile bölgesel gravite modellemeleri için veri uyarlamalı ağ tasarımı
A data-adaptive network design using the mean shift algorithm for regional gravity field modeling with spherical radial basis functions..... 20-31
Raşit ULUĞ
- VMF veri sunucusundan türetilen grid bazlı VMF3 ve GPT3 troposfer modellerinin karşılaştırılması:
Avrupa bölgesi için bir çalışma
Comparison of the grid-wise VMF3 and GPT3 troposphere models derived from the VMF data server:
A study for the European region..... 32-41
Ali Utku AKAR, Cevat İNAL
- Performance assessment of interpolation techniques for investigation Covid-19 spread in Türkiye
Türkiye’de Covid-19 yayılımının araştırılmasında enterpolasyon tekniklerinin performans değerlendirmesi 42-57
Duygu ARICAN, Nursu TUNALIOĞLU
- Konumsal-zamansal taşınmaz değer değişim dinamiklerinin CBS ve istatistiksel analiz teknikleri ile incelenmesi
Investigating spatio-temporal real estate value fluctuation dynamics with GIS and statistical analysis techniques 58-76
Süleyman ŞİŞMAN, Nilay TELLİOĞLU, Arif Çağdaş AYDINOĞLU
- Investigation of the effect of GCP number and distribution on photogrammetric product accuracy in UAV photogrammetry
İHA fotogrametrisinde YKN sayısı ve dağılımının fotogrametrik ürün doğruluğuna etkisinin araştırılması..... 77-88
Tarık TÜRK, Berkay BAHADUR, Yasin DEMİREL, Cemali ALTUNTAŞ, Taylan ÖCALAN

DÜZELTME / CORRIGENDUM

- Arazi ve arsa düzenlemesinde kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının incelenmesi
An analysis of the allocation for expropriation approach in land readjustment..... 89-89
Ahmet YILMAZ, Oytun YILMAZ

Assessment of GNSS-IR performance using multi-GNSS and multi-frequency SNR data from smartphones

Cemali Altuntas^{1*} , Nursu Tunalioglu¹ 

¹Yildiz Technical University, Campus of Davutpaşa, Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatic Engineering, Esenler, Istanbul, Türkiye.

Abstract: Smartphones are equipped with embedded Global Navigation Satellite Systems (GNSS) chips that support multiple satellite systems, enhancing precision in positioning, navigation, and timing services. The introduction of GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) leverages these capabilities by analyzing multipath signals and reflections to estimate surface properties more accurately. Given their multi-GNSS and multi-frequency capabilities, along with lower cost and greater portability compared to traditional geodetic receivers, smartphones hold significant potential for application in GNSS-IR technologies. In this study, we conducted a three-day experimental evaluation, observing for six hours each day to assess the accuracy of reflector height and change estimations from multi-frequency multi-GNSS SNR data provided by geodetic receivers and smartphones. The setup included two CHC i90 Pro geodetic receivers and two Samsung Galaxy Note 20 Ultra smartphones, positioned in both zenith-looking and nadir-looking orientations, facilitated by an experimental setup developed under TÜBİTAK project number 121Y348. Our analysis focused on the number of valid estimations, peak-to-background noise ratio (PBNR) values, and the accuracy of reflector height and height difference estimations with satellite-based and frequency-based assessments. According to the results, geodetic receivers consistently outperform smartphones in data collection stability for GNSS-IR applications. We also found that the platform orientation of smartphones (flat, inverted, or inclined) has a minimal impact on the accuracy of GNSS-IR estimations, and the most reliable smartphone data is obtained from GPS satellites. Furthermore, using signals with wavelengths shorter than 20 cm in smartphone-based GNSS-IR studies provides better results and offers a cost-effective method for long-term monitoring of climatological parameters such as snow depth, sea level, and vegetation height.

Keywords: Multi-GNSS, Multipath, GNSS-IR, SNR, Smartphone

Akıllı telefonların çok frekanslı çoklu-GNSS SNR verilerinin GNSS-IR performansının değerlendirilmesi

Öz: Akıllı telefonlar, birden fazla uydu sistemini destekleyen gömülü Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) çipleri ile donatılmıştır. Bu durum konum belirleme, navigasyon ve zaman ölçümü çalışmalarında doğruluğu artırmaktadır. GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR) yöntemiyle, bu özelliklerden faydalanılarak yüzey özelliklerini daha doğru kestirmek için çok yolluluk etkisindeki sinyallerin ve yansımaların analizi gerçekleştirilebilmektedir. Çok frekanslı çoklu-GNSS veri toplama kabiliyetine sahip olmalarının yanı sıra, geleneksel jeodezik alıcılara kıyasla daha düşük maliyetli ve taşınabilir olmaları nedeniyle akıllı telefonlar, GNSS-IR çalışmalarında uygulama için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, jeodezik alıcılar ve akıllı telefonlardan sağlanan çok frekanslı çoklu-GNSS SNR verilerinden elde edilen reflektör yüksekliği ve yükseklik değişimine ilişkin kestirimlerin doğruluğunu değerlendirmek için her gün altı saatlik ortak gözlem içeren üç günlük bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. 121Y348 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilen deney düzeneğine, iki CHC i90 Pro jeodezik alıcı ve iki Samsung Galaxy Note 20 Ultra akıllı telefon, başucu ve ayakucu doğrultularına bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Geçerli kestirim sayısı, pik-arka plan gürültü oranı değerleri, reflektör yüksekliği ve yükseklik değişimi kestirimlerinin doğruluğu üzerinden uydu sistemi ve frekans temelli değerlendirme yapılmıştır. Bulgular, jeodezik alıcıların GNSS-IR uygulamalarında veri toplama stabilitesi yönünden akıllı telefonlardan daha üstün performans sağladığını göstermiştir. Ayrıca, akıllı telefonların yöneliminin (düz, ters veya eğimli) GNSS-IR kestirimlerinin doğruluğu üzerindeki etkisinin çok az olduğu ve en stabil akıllı telefon verilerinin GPS uydularından elde edildiği görülmüştür. Buna ek olarak, 20 cm'den kısa dalga boyuna sahip sinyallerin akıllı telefon tabanlı GNSS-IR çalışmalarında kullanılmasının daha iyi sonuçlar sağladığı ve kar kalınlığı, deniz seviyesi ve bitki yüksekliği gibi iklimbilimsel parametrelerin uzun vadeli izlenmesi için düşük maliyetli bir alternatif teşkil ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Çoklu-GNSS, Çok yolluluk, GNSS-IR, SNR, Akıllı telefon

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 212 383 5309

Geliş Tarihi/Received: 11.05.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 16.07.2024



0000-0002-9660-6124, cemali@yildiz.edu.tr (Altuntas C.)*
0000-0001-9345-5220, ntunali@yildiz.edu.tr (Tunalioglu N.)

1. Introduction

The number and usage rate of portable and wearable mobile technological devices such as smartphones, tablets, and smartwatches, as well as the interest in innovative applications and designs involving these devices, are increasingly growing. In the 21st century, smartphones, in particular, are actively used as personal assistants to many people. Smartphones offer versatile and useful features, considering their ability to provide mobile internet access, voice/video calling services, execute various sensor-based applications, deliver quick solutions for positioning, navigation, and timing (PNT) with Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and their easy portability. Consequently, the economic market size of smartphones is considerably larger compared to other mobile devices. According to the European GNSS Agency (GSA) 2019 Market Report, the number of smartphone users worldwide is projected to reach 3.5 billion by the end of 2020 (GSA, 2019). Also, according to the European Union Agency for the Space Program (EUSPA) Earth Observation (EO) and GNSS Market Report 2024, the annual shipments of GNSS devices are forecasted to rise from 1.6 billion units in 2023 to 2.2 billion units in 2033, with Consumer Solutions (such as smartphones, fitness devices, and tablets) and Road and Automotive (including in-vehicle systems and various types of on-board units) accounting for the majority of the shipments by 2033 (EUSPA, 2024). The significant potential for use and the advantages in terms of mobility have recently enabled the use of smartphones in engineering measurement applications as well. Moreover, these devices are now equipped with GNSS chips, LiDAR, accelerometers, and other sensor-based enhancements and software, enabling various engineering applications.

Smartphones contain a variety of sensors, among which the embedded GNSS chips are crucial. These modular chips, which integrate receiver and antenna structures, provide PNT services at various accuracy levels, and are incorporated into smartphones along with other sensors. Initially, GPS chips were first added to smartphones in 1999. However, modern smartphones now support multi-GNSS systems, including GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, and SBAS, enhancing positioning capabilities. A significant development occurred in May 2016 when Google announced at the I/O 2016 conference that with Android 7.0 (Nougat), it would open access to raw GNSS data collected by smart devices. This move facilitates the processing of raw GNSS data, using code, carrier phase, and Doppler observations from satellites, which has opened opportunities for research into sub-meter level positioning accuracy (Banville & van Diggelen, 2016). Another significant step forward in GNSS positioning for smartphones occurred in May 2018 with the introduction of the Mi8 by Xiaomi, the world's first dual-frequency smartphone. The Xiaomi Mi8 is equipped with the Broadcom BCM47755 embedded GNSS chip, capable of recording signals from GPS L1/L5 and Galileo E1/E5a. This model also supports single-frequency signals from GLONASS, BeiDou, and QZSS. This development marked the beginning of achieving centimeter-level accuracy in positioning with smartphones, fundamentally changing research into precision positioning with mobile devices. By offering a cost-effective alternative to expensive geodetic receivers, it has led to numerous studies on the usability of affordable smartphones in engineering applications (Robustelli et al., 2019).

One of the fundamental differences between geodetic GNSS receivers and smartphone GNSS chips lies in the characteristics of the antennas used. Geodetic antennas typically use circular polarization, while smartphone GNSS chip antennas have linear polarization. This difference makes the smartphone GNSS antennas more susceptible to the multipath effects of GNSS signals reflected from nearby surfaces. As a result, smartphone GNSS antennas generally collect lower quality GNSS measurements compared to geodetic GNSS receiver antennas, which are designed to minimize multipath effects, creating a disadvantage for smartphone based GNSS positioning. However, a method known as GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR), utilized for approximately the last 15 years, takes advantage of these unwanted multipath signals for precise positioning by analyzing the oscillations they cause in signal strength. This analysis allows determining the geometric and radiometric characteristics of the reflective surfaces. The additional path created by the reflected signal can introduce errors of up to a

meter in precise positioning. Still, since the power of the multipath-affected signal is related to the geometry between the antenna phase center (APC) and the reflective surface, this data is valuable for estimating the vertical distance between the APC and the ground. The data indicating signal strength, typically presented as the carrier-to-noise density ratio (C/N0) or signal-to-noise ratio (SNR), is provided to users by receivers and smartphones. SNR-based GNSS-IR has been effectively used to determine climatological parameters such as soil moisture (Altuntas & Tunalioglu, 2020; Chew et al., 2013; Larson et al., 2008), snow depth (Larson et al., 2009; Nievinski & Larson, 2014; Tunalioglu et al., 2019), and sea level (Altuntas & Tunalioglu, 2023; Besel & Kayikci, 2021; Hu et al., 2021; Larson et al., 2013; Williams et al., 2020).

In the first study to examine the altimetric performance of the GNSS-IR method using SNR data from mobile devices, Strandberg and Haas (2019) analyzed SNR data from the GTGU GNSS station located at the Onsala Space Observatory in Sweden and from a Samsung Galaxy Tab A 10.1 4G tablet. They correlated the estimated reflector heights with sea level measurements. The sea level values were validated with tide gauge measurements located a few meters from the GNSS station. The RMSE (Root Mean Square Error) between the sea level estimates derived from the GNSS station and tablet data, and the tide gauge measurements obtained as 6.2 cm. The study also noted that the tablet provided only L1 frequency data, resulting in a significantly lower number of valid estimates throughout the study period compared to a geodetic receiver capable of handling L1, L2, and L5 frequencies. Altuntas and Tunalioglu (2021) conducted an experimental study in which they analyzed multi-GNSS SNR data obtained from a Xiaomi Mi8 Lite smartphone, and a Trimble NetR9 geodetic receiver connected to a TRM57970 geodetic GNSS antenna. Over a period of three days, measurements were taken for five hours each day to assess the accuracy of reflector height estimations. The study found that the RMSE values were 1.9 cm for the smartphone and 3.7 cm for the geodetic antenna when compared to in-situ measurements. Liu et al. (2022) evaluated the altimetry performance using multi-GNSS SNR data collected from a Huawei P30 smartphone, which was paired with a low-cost antenna-equipped u-blox F9P receiver. In their study, which analyzed 20 days of data, it was found that the GPS L1, GLONASS G1, and BDS B1I frequencies provided precise and stable reflector height measurements. However, the performance of GPS L5 and Galileo E5a was somewhat lower. Chen et al. (2023) assessed the performance and feasibility of low-cost GNSS devices for temporary sea level measurements. The study utilized several devices, including a Redmi Note 9 Pro smartphone connected to a BT560 antenna and a CHCNAV P5 GNSS receiver, alongside another receiver with a standard geodetic-quality antenna and a pressure tide gauge for comparison. After collecting and analyzing over 80 hours of SNR data from various GNSS constellations, the research concluded that low-cost GNSS devices could provide stable sea level measurements with a RMSE of approximately 16 cm, which is comparable to, or even slightly better than, that of traditional geodetic-quality devices. Zheng and Chai (2023) investigated the accuracy of ground height retrieval using GNSS-IR technology. The study involved Hi-Target geodetic GNSS receivers, an Honor 60 smartphone, and a Huawei MatePad Pro tablet to collect data over five days, with antenna heights ranging from 0.8 m to 1.6 m. It was found that a linear relationship could be established between the inversion error and antenna height, with an RMSE for smart devices at 4.7 cm and 4.2 cm, compared to 1.0 cm for geodetic GNSS receivers. The RMSE values mentioned pertain to the performance of both smartphones and GNSS receivers under varying antenna height conditions, indicating the height estimation error for each device over the range of station heights.

Considering existing studies on GNSS-IR with mobile devices, it appears that there is no comprehensive evaluation in the literature of Android-based smartphones equipped with dual-frequency multi-GNSS chips across different frequency ranges and constellations. In this study, an experimental evaluation was conducted over three days, with six hours of observation daily, aiming to assess the accuracy of reflector height estimations derived from dual-frequency multi-GNSS SNR data provided by smartphones, based on varying reflector heights and receiver orientations. The setup included two CHC i90 Pro geodetic receivers and two Samsung Galaxy Note 20 Ultra smartphones, arranged in both zenith and inverted orientations.

Changes in height and orientation were facilitated by an experimental setup developed under the TÜBİTAK project number 121Y348. The results were analyzed based on the number of valid estimations, peak-to-background noise ratio (PBNR) values, and accuracy of reflector height and reflector height difference estimations.

2. SNR Based GNSS-IR

The signals transmitted by GNSS satellites are subject to various effects caused by interactions with atmospheric layers such as the ionosphere and troposphere, as they travel to the receiver antenna. One significant impact these signals face is the multipath effect, which occurs when the signal transmitted from the satellite reflects off one or more surfaces until it reaches the receiver. In ground based GNSS measurements where multipath effects are present, the signals coming directly from the satellite and those reflected from nearby surfaces interfere at the APC of the receiver, resulting a composite signal. Although this composite signal is a challenging source of error in positioning applications, it provides an alternative opportunity to determine the geometric and radiometric characteristics of the reflected surface when analyzed using a method known as GNSS-IR.

GNSS receivers not only provide phase information of the signal but also code measurements and navigation messages, as well as the power and noise of the signal. GNSS antennas detect signals emitted by GNSS satellites, and these signals are then processed by GNSS receivers. The signal strength, usually expressed as C/N_0 , can be converted to SNR assuming a noise bandwidth of 1 Hz (Larson & Nievinski, 2013). SNR is composed of trend and harmonic components of direct and reflected signals due to interference and antenna gain pattern (AGP):

$$SNR = tSNR + dSNR \quad (1)$$

where $tSNR$ denotes the trend of the SNR signal and $dSNR$ denotes the detrended SNR signal. The $tSNR$ is largely dependent on the AGP of the receiver and can be modeled and extracted using a polynomial of second degree or higher. The $dSNR$ signal, obtained after the trend is removed, has a periodic nature and can be expressed as follows (Larson et al., 2008):

$$dSNR = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin \varepsilon + \phi\right) \quad (2)$$

Here, A and ϕ represent the amplitude and phase of the $dSNR$ signal, respectively, h denotes the vertical distance between the APC and the reflected surface (i.e., reflector height), λ denotes the wavelength of the GNSS signal, and ε indicates the satellite elevation angle. Since $\sin \varepsilon$ is the independent variable of the $dSNR$ signal, the following relationship exists between the dominant frequency (f) of the $dSNR$ signal and the reflector height:

$$h = \frac{f\lambda}{2} \quad (3)$$

Since $\sin \varepsilon$ is the sine of the satellite elevation angle, it is irregularly sampled. Therefore, in this study, the Lomb-Scargle Periodogram (LSP) analysis, commonly used for irregularly sampled data, was used to find the dominant frequency of the $dSNR$ signal (Lomb, 1976; Scargle, 1982). The dominant frequency values were then converted into reflector heights using Equation (3).

3. Materials and Methods

This section begins by introducing the study area and the setup developed for the experimental study under the project. It then proceeds with preliminary analysis steps to determine appropriate parameters for the azimuth range, satellite elevation angle range, and minimum PBNR condition, followed by further analysis procedures.

3.1 Study Area and Experimental Design

The study area is located within the Yıldız Technical University's Davutpaşa Campus in Istanbul, Turkey (Figure 1). The primary reason for selecting this area was its capacity to provide extensive views along the southeast and southwest lines and to offer a surface with low roughness, which helps eliminate topographical effects that could impact the study results. The study area measures approximately 90 m x 140 m. The experimental study involved collecting measurements for two 3-hour periods each day on the 283rd, 284th, and 286th days of the year (DoY), October 10, 11, and 13, 2022, conducting a 3-day experiment.

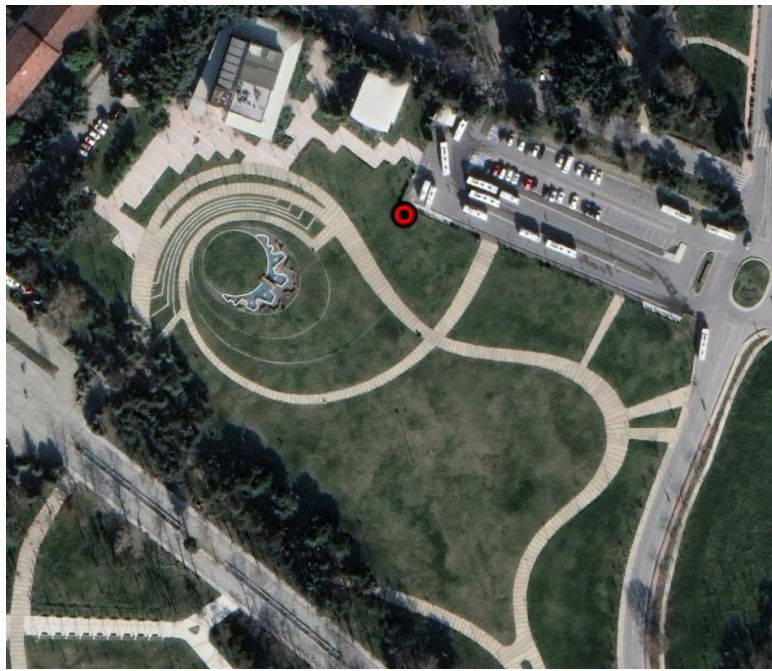


Figure 1: Study area

In the conducted experiment, two CHC i90 Pro geodetic receivers and two Samsung Galaxy Note 20 Ultra smartphones were used. The receivers and smartphones were set up with (1) a 20% incline on the first day, (2) a -20% incline on the second day, and (3) a 0% incline (i.e., standard orientation) on the third day (Figure 2). Here, the positive and negative inclines refer to the tilt observed when viewing the platform from the side, with the azimuth direction on the right-hand side. One of the aims of this experiment was to determine the effects of these inclinations on the estimation of SNR metrics. The receivers and experimental setup were oriented towards a 160° azimuth for all three days to face the smooth surface of the terrain. Observations were carried out daily between 09:30 and 15:30 local time (UTC+3). After three hours of observation each day, the reflector heights were decreased by 10 cm, and the remaining three hours of observation were conducted at these reduced reflector heights. The in-situ reflector heights obtained by measuring the Antenna Reference Point (ARP) heights are provided in Table 1.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2: (a) General view of the experimental setup and the inclinations applied to the receivers in the setup for three separate days (b) Day 1: October 10, 2022 (20%), (c) Day 2: October 11, 2022 (-20%), (d) Day 3: October 13, 2022 (0%)

Table 1: In-situ reflector heights found by adding the offset values from the NGS antenna calibration report to the ARP heights

Receiver		Day 1 (DoY: 283)	Day 2 (DoY: 284)	Day 3 (DoY: 286)
CHC1	Reflector height (first 3 h) (m)	1.910	1.965	1.990
	Reflector height (last 3 h) (m)	1.820	1.860	1.885
CHC2	Reflector height (first 3 h) (m)	1.135	1.135	1.170
	Reflector height (last 3 h) (m)	1.090	1.015	1.065
SP01	Reflector height (first 3 h) (m)	1.945	1.940	1.940
	Reflector height (last 3 h) (m)	1.845	1.845	1.840
SP02	Reflector height (first 3 h) (m)	1.260	1.240	1.240
	Reflector height (last 3 h) (m)	1.160	1.140	1.140
Orientation		20%	20%	-20%

3.2 Preliminary Design

The analysis was conducted in two stages. During the preliminary analysis phase, general evaluations were made and appropriate criteria for further analysis were determined. The second stage aimed to develop final results by implementing

strategies based on the outcomes of the first stage. In the preliminary analysis phase, a 0° - 360° azimuth range was used to assess signals coming from all directions. A satellite elevation angle range of 5° - 25° was chosen. The minimum satellite elevation angle range condition was set at 10° , and the minimum PBNR condition was set at 3. Since the reflector heights were decreased by 10 cm after the first three hours of observation each day, the analysis results were evaluated separately for the first three hours and the last three hours.

3.2.1 Suitability of the Azimuth Range

Since no azimuth mask was applied, the initial evaluation focused on determining the suitability of the azimuth range used. Data obtained during the first three hours of the first day of the experiment were analyzed to estimate reflector heights. Since the heights of the receivers varied, the median reflector height for each receiver was calculated, and the deviation of each estimate from its median value was computed. The variation of these differences according to azimuth is shown in Figure 3.

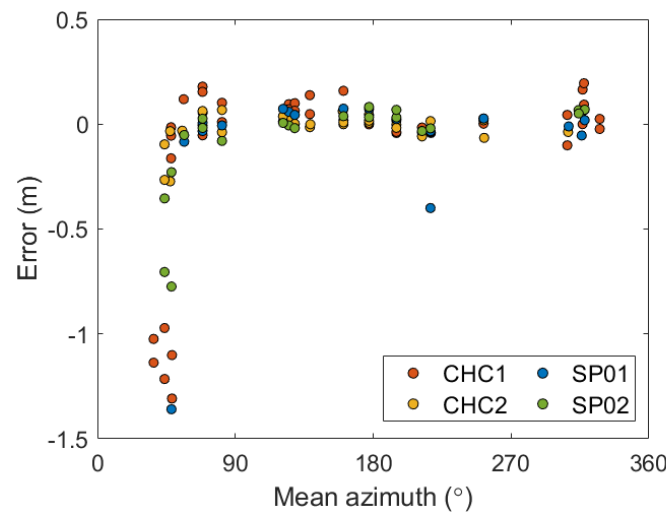


Figure 3: Variation of estimation errors with azimuth

According to Figure 3, it is evident that data with an average azimuth value below 45 - 50° tend to result in worse reflector height estimates. The main reason for this appears to be that the surface in these azimuth directions is not sufficiently wide and smooth. Considering that the average azimuth width for the visualized data is 10.5° , using an azimuth range of 60° - 360° instead of 0° - 360° would exclude estimates with high errors due to azimuth-related factors. Therefore, an azimuth range of 60° - 360° will be applied in the further analysis phase.

3.2.2 Minimum Satellite Elevation Angle Range Width Condition

Accurate estimation of SNR metrics requires sufficiently long data for each satellite pass, but there is no widely accepted standard for this in the literature. The oscillations in SNR data caused by multipath are directly related to the reflector height; a higher reflector height increases the frequency of SNR oscillations, while a lower one decreases it. Detrended SNR data, when lacking sufficient waveforms, results in lower spectral resolution of frequency estimation. The amount of wave contained in the $dSNR$ data is a function of the sine of the satellite elevation angle, and thus varies more with the range of satellite elevation angles than with time. To illustrate this effect, S1C signal data from satellite G27 received by a smartphone (SP01) on the first day of the experiment was analyzed. This SNR data was detrended using a third-degree polynomial. Reflector height estimates, PBNR values, and LSP peak widths (PW) for different satellite elevation angle ranges and widths are given in Table 2, and the data and LSP graphs are shown in Figure 4. Here, the PBNR value is the ratio of the LSP peak spectral amplitude to the average spectral amplitude, while the LSP peak width is the width of the peak at half its maximum

spectral amplitude value, and the term “error” refers to the difference between the single reflector height estimate and the in-situ value for a selected satellite, and its specific $dSNR$ data.

Table 2: Reflector height (RH) estimates, estimation errors, PBNR values, and LSP PW values obtained using different satellite elevation angle ranges and range widths for the G27 S1C signal collected by the smartphone SP01 on DoY: 283

Range (°)	Range width (°)	RH (m)	Error (cm)	PBNR	PW (m)
5-25	20	1.960	1.5	6.78	0.336
5-20	15	1.977	3.2	5.71	0.444
5-15	10	1.934	-1.1	4.11	0.669
5-10	5	2.017	7.2	2.84	1.258
10-25	15	1.949	0.4	5.51	0.457
10-20	10	1.954	0.9	3.91	0.709
10-15	5	2.427	48.2	2.26	1.287
15-25	10	1.941	-0.4	4.46	0.764
15-20	5	2.130	18.5	2.82	1.399
20-25	5	2.520	57.5	2.35	2.011

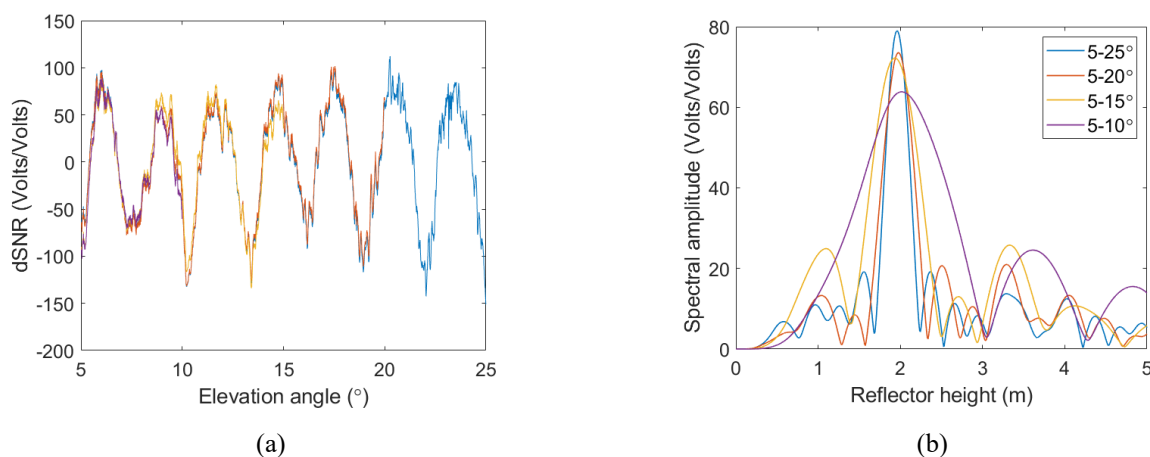


Figure 4: (a) $dSNR$ data and (b) LSP graphs for different satellite elevation angle ranges of the G27 S1C data collected by the smartphone SP01 on DoY: 283

Considering the values in Table 2, it is seen that reducing the range width increases estimation errors, decreases PBNR values, and increases PW values. The PW value is inversely proportional to the spectral resolution of the frequency; therefore, an increase in PW value reduces the reliability of the estimates. PBNR value is widely used in literature for determining good reflector heights and is expected to exceed a certain threshold. Thus, a low PBNR value indicates a weak and/or noisy $dSNR$ signal, leading to less accurate estimates. Overall, the results in Table 2 show that when the range width is 10°, 15°, and 20°, estimation errors are below 4 cm, PBNR values are above 3, and PW values are below 0.8 m.

Figure 4 displays an example of a $dSNR$ data with strong reflection. As the range width decreases, the full wave count drops from 7 to 2. Consequently, the peaks in the LSP graph widen, increasing the uncertainty of the estimates. Considering that the sample data in Figure 4 is one of the best series among the data, reducing the range widths not only increases peak widths but also leads to higher errors in reflector height estimates. Keeping the minimum satellite elevation angle range width at the maximum (20° for this analysis) would exclude many data points, significantly reducing the number of estimates. Therefore, based on these results, a 10° value has been chosen to be applied as the minimum range width condition, ensuring an

acceptable level of error (<4 cm) and a higher number of estimates.

3.2.3 Minimum PBNR Condition

The PBNR value is the ratio of the maximum amplitude in the LSP to the background noise. It is commonly used as a quality control criterion for signals in the literature. This is because having a strong amplitude alone may not suffice for determining the frequency of a signal. High amplitude values become insignificant if the signal is interfered with by other signals of different power and frequency or if the noise level is high. Therefore, the strength of a signal in terms of frequency discrimination is measured not by the level of its amplitude alone, but by its level relative to the background noise. Although the minimum PBNR ratio is conventionally chosen as 4 in the literature, there are studies where it is used as 2, 2.5, or 3, depending on the data or the characteristics of the terrain surface (Altuntas et al., 2022).

In the experimental study conducted, receivers were subjected to both positive and negative 20% inclinations. It is known that the AGP of geodetic receivers is designed to receive signals from low satellite elevation angles with lower gain. The impact of multipath in the SNR data of a geodetic receiver set up on a flat platform is predominant up to 25° to 30° . When the receiver platform is inclined positively, multipath-induced oscillations will be weaker or less frequent in the direction of the azimuth to which the platform is oriented. In this case, it would be inappropriate to require a minimum PBNR of 4 for data from a standard setup geodetic receiver. Therefore, for appropriate comparison of data across different days, using a threshold value of 3, as used in the literature, would be more suitable.

3.3 Further Analysis

In the further analysis phase, evaluation strategies suitable for the station are applied based on the results from the preliminary analysis. Here, a common evaluation strategy has been implemented for both geodetic receivers and smartphones. The degree of the polynomial used to remove the trend in the SNR data was chosen as 5 to eliminate possible low-frequency components. The analyses utilized a satellite elevation angle range of 5° - 25° and an azimuth range of 60° - 360° , and the data provided by the receivers and smartphones were evaluated to include all satellite systems and frequencies. The results obtained with this analysis strategy are examined in detail for different satellite systems and frequencies in the following section.

4. Results and Discussion

4.1 Satellite System Based Assessment

All receivers used in the study have the capability to collect data from four constellations (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Signals from different satellite systems can be distinguished by technical characteristics such as frequency, power, and modulation. Therefore, a satellite system-based analysis is necessary to assess the performance of these systems. The analysis was conducted to include results from two strategies: one where PBNR and minimum satellite elevation angle range width conditions were not applied, and another where they were applied. Scenarios where conditions are applied are labeled as “valid”.

4.1.1 Number of Estimations

In the satellite system-based evaluation, the following results have been obtained regarding the number of estimates:

- For the receiver CHC1, 208 out of 430 estimates are valid (48.4%), while for CHC2, 244 out of 425 estimates are valid (57.4%). For the smartphone SP01, 74 out of 164 estimates are valid (45.1%), and for SP02, 96 out of 213 estimates are valid (45.1%).

- The valid estimation rate for the geodetic receiver CHC1 was 43.2% on the first day, 50.7% on the second day, and 51.0% on the third day. These rates for CHC2 were 48.5%, 58.0%, and 64.9% respectively. The lower valid estimation rate for CHC1 on the first day can be explained by the AGP of the geodetic receiver. AGP is generally designed to provide maximum gain from the overhead direction and minimum gain from the horizon for the geodetic receivers. On the first day of the experiment, the receiver platform had a positive 20° incline, so the high-gain direction of CHC1's antenna was directed away from the 160° azimuth aligned with the experimental setup. This situation led to multipath effects being received with lower gain and caused a decrease in the number of valid estimates for GNSS-IR. The difference between valid estimation rates on the second and third days, where CHC1 receiver platform was negatively inclined and flat, was only 0.3%. Since the elevation angle range of 5°-25° was used for all days, it is understandable that there was no significant difference in the valid estimation rate between the last two days. The highest valid estimation rate for CHC2 was recorded on the last day at 64.9%. Generally, CHC2 has shown superiority over CHC1 in terms of the number of estimates and valid estimation rates.
- For the smartphone SP01, there was no valid estimate during the last three hours of the second day due to data interruption. When other periods were examined, the highest number of estimates was provided by GPS satellite system data, followed by Galileo and BeiDou systems.
- On the first day of the experiment with the smartphone SP01, no estimates were obtained from GLONASS data; on the second day from BeiDou and GLONASS data; and on the third day from Galileo satellites. In the smartphone SP02, no data was obtained from the GLONASS satellite on all three days of the experiment. This issue is thought to be due to software or hardware problems within the smartphone.
- For both SP01 and SP02, the most stable data obtained with GPS, and in terms of GNSS-IR valid estimation numbers, BeiDou system data followed GPS. However, for the Galileo system, although the number of estimates was high, the valid estimation rate was considerably low (17.1% for SP01 and 25.6% for SP02).

4.1.2 PBNR Values

In GNSS-IR analyses, the PBNR value is a commonly used quality control criterion. A high PBNR value indicates the presence of a regular reflection effect. In the satellite system-based evaluation, the following results have been obtained regarding PBNR values:

- For the receiver CHC1, the lowest PBNR values were obtained on the first day of the experiment, while the highest PBNR values were recorded on the second day. Considering that the receiver platform was positively inclined on the first day and negatively inclined on the second day and taking into account the AGP of the geodetic receivers, it can be said that the results match expectations. A similar situation applies to the receiver CHC2, which, being installed opposite to the zenith direction, shows an inverse correlation with the AGP effect compared to CHC1. According to the results, for CHC2, PBNR values of 11.7 and 10.5 were obtained on the first day, and 6.1 and 5.8 on the second day, for first 3-h and last 3-h periods, respectively. The orientation of CHC2, facing the same direction as the experimental setup on the first day and the opposite direction on the second day at a specific incline, resulted in higher PBNR values on the first day.
- When considering valid estimates from the geodetic receivers CHC1 and CHC2, the system providing the highest average PBNR value is Galileo, followed by GPS, GLONASS, and BeiDou.

- The PBNR values obtained for the smartphones SP01 and SP02 indicate that positioning the smartphones towards or away from the zenith direction has a weak impact on PBNR values. Similarly, it has been observed that the incline given to the platform does not significantly affect the PBNR values of the data.

4.1.3 Reflector Height Estimations

After the evaluation of PBNR values, the following results have been obtained for reflector height estimates in a satellite system-based assessment:

- For the CHC1, reflector height estimates on the first day showed errors of -4.1 cm and -6.2 cm, on the second day -4.2 cm and -2.5 cm, and on the last day -6.4 cm and -4.8 cm. The unidirectional nature of the errors suggests a negative bias in the estimates, which could be attributed to changes in terrain slope and surface roughness.
- The standard deviations of reflector height estimates with the CHC1 receiver were 8.2 cm and 6.7 cm on the first day, 4.9 cm and 5.6 cm on the second day, and 6.1 cm on both periods of the third day. The best standard deviation value was achieved on the second day when the antenna orientation was towards the 160° azimuth directed by the experimental setup, while the highest standard deviations over the three days occurred on the first day when the receiver's orientation was opposite to the setup. The results support the suitability of tilting the receiver platform toward the direction of interest on the terrain surface for GNSS-IR studies.
- Negative errors were also found in the reflector height estimates with the CHC2. Especially in the first periods, biases of -4.8, -3.2, and -6.1 cm were observed. In the second periods, positive errors of 0.8, 6.2, and 1.0 cm were seen from the first to the third day. However, looking at the standard deviations of the estimates, especially on the second and third days in the second periods, high values are observed. The value on the second day was 17.9 cm, and on the third day, it was 13.2 cm. Thus, it is difficult to assert a positive bias in the second period measurements. However, since the standard deviation values are lower in the first period measurements (respectively 4.5 cm, 9.4 cm, and 7.3 cm) and consistent results were obtained with CHC1, a negative bias can be claimed. The most precise results with CHC2 were obtained on the first day of the experiment, largely due to the AGP effect of the receiver.
- There were no significant differences in the performance of the satellite systems for reflector height estimates with CHC1. However, in CHC2, especially on the second day measurements, errors reaching up to 45 cm were observed in Galileo and GLONASS estimates. The increase in error amounts in the estimates obtained from CHC2 data in the second period measurements is due to the receiver being much closer to the ground than CHC1, thereby reducing the number of waves in the SNR data compared to data from CHC1 and decreasing the spectral resolution. The reduction in the number of complete waves lowers the spectral resolution, which in turn reduces the precision of the estimated frequency and thus the reflector height.
- On the smartphone SP01, a data interruption occurred during the second period of the second day. The sensitivity of the measurements in the first period of the second day was also lower compared to other days. While the reflector height estimation error on the second day's first period measurements was 32.6 cm, the standard deviation of the estimates was 16.6 cm. The number of estimates is significantly lower than first period of the first and third days. On the first day, the first period had 14 valid estimates, on the third day 20, while on the second day, the first period had only 6. Therefore, the statistical reliability of SP01's second day first period measurements is low. Consequently, this period will be excluded in evaluating performance of SP01.

- Examining the estimates from SP01 on the first and third days, the estimation errors are seen to be negatively directed. Errors on the first day were -4.0 cm and -6.1 cm, and on the second day -5.7 and -6.2 cm. There is also observed to be a negative bias in the estimates made with SP01 data. Therefore, the possibility that the negative bias in CHC1 estimates is receiver-induced is low. These errors are thought to stem from the surface characteristics of the terrain. Negative errors in SP02 estimates are only seen on the first day and the first period of the third day.
- It has been observed that the most stable data on the smartphones SP01 and SP02 is provided by GPS satellites. The largest data gap occurs in GLONASS satellite data. Data interruptions in Galileo and BeiDou signals have also been noted on the second day. Considering that geodetic receivers were able to collect a sufficient amount of data from various systems at the same times and days, these problems are thought to stem from the software and hardware characteristics of the smartphones.

Figure 5 shows the estimation errors and the standard deviations of estimates made with both the receivers and smartphones. Particularly, the CHC2 has been observed to provide estimates with high standard deviations during the second period measurements. The CHC1 has provided the most stable estimates in the first period measurements. The performance of the smartphone SP01, when excluding the second day, is close to that of CHC1. Overall, it has been observed that reflector height estimation with an accuracy of 5-10 cm can be achieved using both geodetic receivers and smartphones with standard setups.

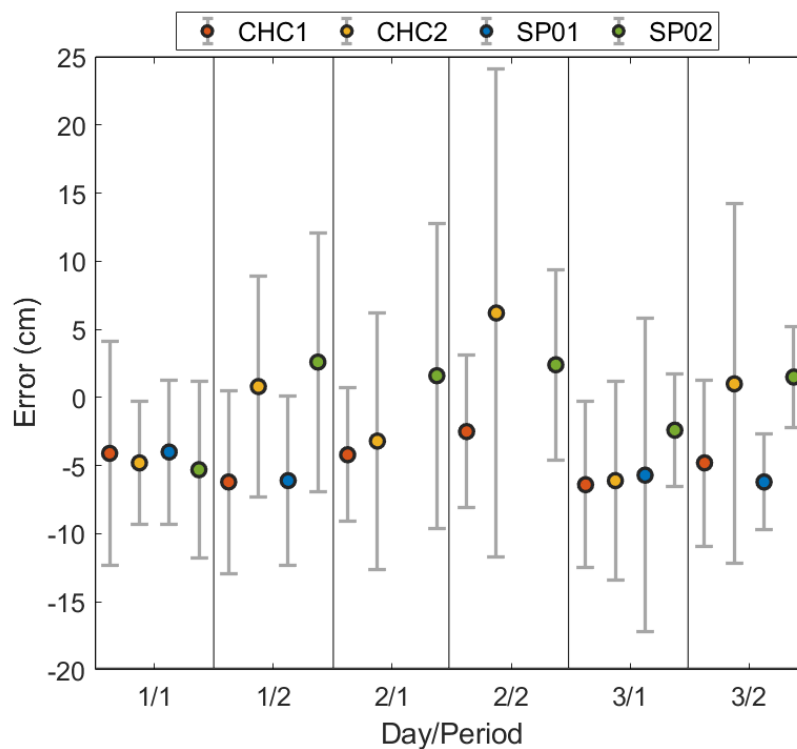


Figure 5: Errors of reflector height estimations with geodetic receivers and smartphone data on different days and periods

4.1.4 Reflector Height Change Estimations

One of the most significant outcomes of this study is the estimation of height changes. This is crucial because long-term monitoring of climatic parameters such as snow depth and sea level relies on revealing their temporal changes, i.e., determining height variations. In this study, a height change of 10 cm between two periods was planned. However, the application of this value varied on some days during fieldwork and in the experimental setup. The height change measured on the first day was 9.0 cm and 10.5 cm on subsequent days for the receiver named CHC1, while for CHC2, it was 4.5 cm

on the first day, 12.0 cm on the second day, and 10.5 cm measured on subsequent days. For the receivers SP01 and SP02, except for the second day when data interruption occurred in SP01, a height change of 10 cm was successfully applied each day.

Height change estimates made with the receiver named CHC1, when evaluated collectively across all satellite systems, were obtained as 11.1 cm on the first day, 8.0 cm on the second day, and 8.9 cm on the third day. Except for estimates made with BeiDou data on the first day, GLONASS data on the second day, and Galileo data on the third day, a 10 cm height change was determined with estimation errors below 3 cm. However, estimates with CHC2 contain significant errors. Particularly on the second day, the high standard deviations of the reflector height estimations also affected the accuracy of the height differences. Some systems provided results close to the in-situ values on different days of the experiment. For example, the height change estimate made with BeiDou data on the first day is 4.7 cm, while the in-situ value that day is 4.5 cm. It is evident from the results that the satellite system-based classification was not sufficient to separate good and bad signals for the receiver named CHC2. A frequency-based evaluation might be more suitable for this receiver configuration.

Estimations obtained with data from the smartphone SP01 were found as 12.1 cm on the first day and 10.5 cm on the third day. For SP02, the estimates were 2.1 cm on the first day, 9.2 cm on the second day, and 6.1 cm on the third day. The errors in the estimates made with SP02 data, compared to SP01, could be due to it being closer to the ground, which reduces the spectral resolution in frequency estimation, and possible reflections or signal interferences from the experimental setup and receivers mounted on it. To mitigate these potential causes, further studies could place smartphones and receivers on separate setups without any physical connection between them.

4.2 Frequency Based Assessment

The receivers and smartphones used in the study have the capability to collect signals at different frequencies. Different frequencies can be distinguished by their sensitivity to multipath effects and their reflection characteristics. Therefore, a frequency-based analysis is necessary to evaluate the performance of various frequencies. The types of signals, frequency bands, frequencies, and wavelengths that geodetic receivers and smartphones can collect are provided in Table 3. In the table, “k” represents the GLONASS frequency channel, which varies between -7 and +12.

Table 3: Supported signals, frequency bands, frequencies and wavelengths for geodetic receivers and smartphones used

Satellite System	Signal Type	Frequency Band	Frequency (MHz)	Wavelength (cm)	CHC#	SP##
GPS	S1C	L1	1575.42	19.03	+	+
	S2P	L2	1227.60	24.42	+	-
	S5X	L5	1176.45	25.48	+	+
GLONASS	S1C	G1	1602+k x 9/16	18.64-18.76	+	+
	S2P	G2	1246+k x 7/16	23.96-24.12	+	-
Galileo	S1X	E1	1575.42	19.03	+	-
	S5X	E5a	1176.45	25.48	-	+
	S8X	E5 (E5a+E5b)	1191.795	25.15	+	-
BeiDou	S1I	B1	1561.098	19.20	+	-
	S2I	B1-2	1561.098	19.20	-	+
	S6I	B3	1268.52	23.63	+	-

Since observations on the same frequency but different signal types are found in both receivers and smartphones and considering that signal frequency is one of the most crucial parameters affecting surface reflection, different signal types have

been grouped under two categories. Since frequency is inversely proportional and directly related to wavelength, the grouping has been based on wavelength. Therefore, frequency bands with wavelengths shorter than 20 cm and those longer than 20 cm have been categorized as follows, and the results have been derived based on these groups:

- **Frequency Group 1 (FG1):** GPS S1C, GLO S1C, GAL S1X, BDS S1I, and BDS S2I.
- **Frequency Group 2 (FG2):** GPS S2P, GPS S5X, GLO S2P, GAL S5X, GAL S8X, BDS S6I.

4.2.1 Number of Estimation

The number of estimates in Frequency Groups 1 and 2, abbreviated as FG1 and FG2, has been determined separately for each receiver and smartphone. Table 4 presents the number of estimates derived from data collected by the receivers and smartphones.

Table 4: Number of estimations for data at different frequencies collected by geodetic receivers and smartphones

Receiver	Frequency Group	Data type	Day 1		Day 2		Day 3	
			First 3-h	Last 3-h	First 3-h	Last 3-h	First 3-h	Last 3-h
CHC1	FG1	All	26	37	26	41	30	36
		Valid	11	14	11	20	14	19
	FG2	All	32	44	32	47	38	41
		Valid	16	19	19	24	19	22
CHC2	FG1	All	25	36	25	41	30	37
		Valid	12	19	14	23	18	24
	FG2	All	31	42	31	46	38	43
		Valid	17	17	20	26	24	30
SP01	FG1	All	23	28	14	5	24	24
		Valid	13	15	6	-	18	18
	FG2	All	11	13	7	1	9	5
		Valid	1	1	-	-	2	-
SP02	FG1	All	24	28	19	27	24	21
		Valid	13	18	12	18	14	14
	FG2	All	11	14	9	14	11	11
		Valid	3	1	-	2	1	-

According to Table 4, for the geodetic receivers CHC1 and CHC2, the number of estimates in FG2 is higher than in FG1. For the smartphones SP01 and SP02, it has been observed that there are twice as many or more estimates in FG1 compared to FG2. In the smartphone SP01, nearly all valid estimates are obtained with data from FG1. Data from FG2 provided only one valid estimate in each of the two periods on the first day and two valid estimates in the first period on the last day. For the smartphone SP02, FG1 has also emerged as prominent in frequency-based evaluation. Due to the insufficient number of estimates in FG2, its usability in GNSS-IR studies is limited.

4.2.2 PBNR Values

When evaluating different frequency groups in terms of PBNR, it has been observed that geodetic receivers and smartphones produce contrasting results. Accordingly, in geodetic receivers, higher PBNR values are obtained in FG2 compared to FG1, while in smartphones, FG1 yields higher values than FG2. In smartphone data, the PBNR values of data in FG1 are approximately twice those in FG2.

4.2.3 Reflector Height Estimations

Reflector height estimates and standard deviation values obtained from data collected at different frequencies from geodetic receivers and smartphones are provided in Table 5. Values obtained without applying conditions are labeled as “all”, while values obtained when conditions are applied are labeled as “valid”. The values in parentheses represent standard deviations in centimeters.

Table 5: Reflector height estimations and their standard deviations using geodetic receivers and smartphone data at different frequencies (reflector heights in m, standard deviations in cm)

Receiver	Frequency Group	Data type	Day 1		Day 2		Day 3	
			First 3-h	Last 3-h	First 3-h	Last 3-h	First 3-h	Last 3-h
CHC1	FG1	All	1.852 (111.1)	2.317 (124.5)	2.416 (117.5)	2.037 (92.4)	2.080 (71.7)	2.293 (112.1)
		Valid	1.879 (8.1)	1.768 (4.8)	1.924 (3.9)	1.831 (4.4)	1.914 (5.4)	1.827 (5.4)
	FG2	All	1.973 (113.7)	2.266 (124.1)	1.892 (70.1)	2.307 (114.9)	2.050 (91.0)	2.129 (97.8)
		Valid	1.863 (8.5)	1.751 (7.9)	1.922 (5.5)	1.839 (6.6)	1.936 (6.5)	1.845 (6.6)
	FG1	All	1.450 (107.9)	1.780 (131.0)	1.963 (151.7)	1.907 (150.9)	1.430 (107.3)	1.601 (132.9)
		Valid	1.063 (2.4)	1.068 (6.9)	1.071 (3.9)	0.985 (9.7)	1.091 (3.1)	0.984 (5.7)
CHC2	FG2	All	1.818 (142.5)	1.967 (138.6)	1.780 (136.1)	1.945 (142.8)	1.823 (137.0)	1.584 (111.9)
		Valid	1.104 (4.9)	1.130 (8.3)	1.127 (11.4)	1.158 (19.6)	1.122 (9.2)	1.149 (12.9)
	FG1	All	2.457 (125.9)	2.464 (112.1)	2.344 (124.1)	2.104 (217.9)	2.107 (93.4)	2.227 (109.4)
		Valid	1.903 (5.5)	1.774 (4.9)	2.266 (16.6)	-	1.909 (6.0)	1.778 (3.5)
SP01	FG2	All	2.092 (122.2)	2.361 (158.0)	2.822 (92.1)	0.007 (-)	2.512 (129.4)	2.234 (156.5)
		Valid	1.928 (-)	1.936 (-)	-	-	1.647 (25.3)	-
	FG1	All	1.748 (153.1)	1.951 (140.4)	1.461 (90.8)	1.895 (133.2)	1.924 (145.3)	2.180 (153.9)
		Valid	1.184 (4.2)	1.180 (9.3)	1.256 (11.2)	1.149 (3.5)	1.220 (4.0)	1.155 (3.7)
SP02	FG2	All	1.579 (133.3)	2.303 (171.5)	2.257 (136.0)	2.289 (150.1)	2.648 (147.3)	2.461 (194.7)
		Valid	1.308 (4.4)	1.299 (-)	-	1.301 (17.2)	1.165 (-)	-

For the CHC1 receiver, contrary to the number of estimates and PBNR values, more precise results have been obtained in reflector height estimates with data from FG1 compared to FG2. According to the Table 5, for a standard setup situation, it can be said that FG1 data provides better reflector height estimates compared to data from FG2. For the CHC2 receiver, using data from FG1 has significantly improved the quality of reflector height estimates. Therefore, whether the geodetic receiver is installed toward the zenith direction or its opposite, FG1 data is more suitable for GNSS-IR reflector height estimates than FG2 data.

Almost all valid estimates are obtained with data from FG1 with the smartphone SP01. Data from FG2 provided only one valid estimate in each of two periods on the first day and two valid estimates only in the first period on the last day. The standard deviation calculated from these two estimates on the last day is 25.3 cm, indicating that the usability of FG2 data in

GNSS-IR studies with smartphones appears limited. With FG1 data, reflector height estimates with standard deviation values below 6 cm have been achieved for the first and third days. For the smartphone SP02, FG1 has also emerged as prominent in frequency-based evaluation. The insufficient number of estimates in FG2 and the low accuracy of the few estimates it provides limit its usability in GNSS-IR studies. Using only FG1 signals provided better results compared to using all signals. When all signals were used, the standard deviation value found was 6.5 cm on the first day of the first period, which decreased to 4.2 cm when only FG1 signals were used. These values were 7.0 cm when all signals were used and 3.5 cm when only FG1 signals were used on the second day of the second period.

4.2.4 Reflector Height Change Estimations

Estimations of reflector height changes and standard deviation values obtained from data collected at different frequencies from geodetic receivers and smartphones are given in Table 6. Here, the reflector height changes are calculated by subtracting two different reflector heights, so the errors in reflector heights propagate to the error in the change. In these values, only the results obtained when conditions were applied are presented, as values obtained without applying conditions were statistically insignificant.

Table 6: Reflector height change estimations, their standard deviations, and in-situ measurements in cm units, obtained using geodetic receivers and smartphone data at different frequencies

Receiver	Data Type	Day 1	Day 2	Day 3
CHC1	In-situ	9.0	10.5	10.5
	FG1	11.1 (9.4)	9.3 (5.9)	8.7 (7.6)
	FG2	11.2 (11.6)	8.3 (8.6)	9.1 (9.3)
	All	11.1 (10.6)	8.8 (7.4)	8.9 (8.6)
CHC2	In-situ	4.5	12.0	10.5
	FG1	-0.5 (7.3)	8.6 (10.5)	10.7 (6.5)
	FG2	-2.6 (9.6)	-3.1 (22.7)	-2.7 (15.8)
	All	-1.1 (9.3)	2.6 (20.2)	3.4 (15.1)
SP01	In-situ	10.0	9.5	10.0
	FG1	12.9 (7.4)	-	13.1 (6.9)
	FG2	-0.8 (-)	-	-
	All	12.1 (8.2)	-	10.5 (12.0)
SP02	In-situ	10.0	10.0	10.0
	FG1	0.4 (10.2)	10.7 (11.7)	6.5 (5.4)
	FG2	0.9 (4.4)	-	-
	All	2.1 (11.5)	9.2 (13.2)	6.1 (5.5)

Using signals from FG1 in reflector height change estimations with the CHC1 receiver has shown improvement. The standard deviations of height change estimations decreased from 10.6 cm to 9.4 cm on the first day, from 7.4 cm to 5.9 cm on the second day, and from 8.6 cm to 7.6 cm on the third day.

As mentioned in the satellite-based evaluation, it has not been possible to accurately estimate the applied height changes in the field using all signals or when evaluating different satellite systems separately in CHC2 data. However, after grouping the same data into FG1 and FG2, it has been observed that the height changes on the second and third days could be obtained with estimation errors below 3.5 cm using FG1 signals. On the second day, the height change of 12 cm was estimated at 8.6 cm, and on the third day, the height change of 10.5 cm was estimated at 10.7 cm. Height changes found with FG2 signals are not significant. Therefore, it can be said that using signals from FG1 in GNSS-IR studies is appropriate for the CHC2 receiver.

In reflector height change estimations made with data from the smartphones SP01 and SP02, signals from FG1 have been dominant. For SP01, height change estimations using FG1 data are 12.9 cm and 13.1 cm on the first and third days, respectively. For SP02, these values are 0.4 cm on the first day, 10.7 cm on the second day, and 6.5 cm on the third day. For both smartphones, the standard deviations of height change estimations are lower when using FG1 signals compared to when using all signals.

5. Conclusion

In this study, the performance of determining SNR metrics through the analysis of multi-GNSS and multi-frequency SNR data provided by geodetic receivers and Android-based smartphones at different platform inclinations has been comparatively examined. The results from this 3-day experiment have been evaluated in terms of satellite systems and signal frequencies.

Initially, it was observed that the CHC2 receiver provided a higher number of estimates and a higher valid estimate rate compared to the CHC1 receiver. Similarly, higher average PBNR values were obtained with CHC2 compared to CHC1. For smartphones SP01 and SP02, PBNR values were found to be similar, indicating that platform orientation had a weak impact on PBNR values. The inclination of the platform also did not affect the PBNR values for smartphone data. Therefore, depending on the goals of future studies, smartphones can be mounted on flat, inverted, or inclined platforms. The setup does not significantly affect GNSS-IR performance. In reflector height estimations, no significant performance variation dependent on the satellite system was observed for data from the CHC1 receiver. However, in CHC2, errors up to 45 cm were seen with Galileo and GLONASS data on the second day. For smartphones, the most stable data was collected from GPS satellites, with interruptions in Galileo and BeiDou signals observed on the second day.

The 10 cm height change applied to the setup was determined with estimation errors below 3 cm using CHC1. Height change estimates with SP01 and SP02 data varied, with SP02 showing larger errors due to lower spectral resolution and possible signal interferences. To mitigate these issues, future studies could mount smartphones and receivers on separate setups without any physical connection between them. In the frequency-based evaluation, frequencies shorter and longer than 20 cm have been included in FG1 and FG2, respectively, and evaluations have been conducted considering these two groups. It has been observed that geodetic receivers and smartphones produce contrasting results. In geodetic receivers, FG2 provided higher number of estimates and PBNR values than FG1, while in smartphones, FG1 was found to be better.

Reflector height estimations with FG1 data were more precise than those with FG2 data. For CHC2, FG1 data significantly improved reflector height estimations. Based on the results, it is not recommended to use FG2 data when the receiver is set up to face opposite to the zenith direction. In smartphone data, almost all estimates are obtained with FG1 data. The usability of FG2 data in GNSS-IR studies with smartphones is weak due to low number of estimates and accuracy. According to the results, evaluating only FG1 signals instead of all signals in smartphone data has improved the accuracy of the estimates. Using FG1 signals also improved reflector height change estimations with CHC1, reducing estimation errors and standard deviation values. Statistically significant height changes were observed with FG1 signals for CHC2 after frequency-based classification, while FG2 signals proved less meaningful. For smartphones, FG1 data provided better standard deviations compared to using all signals.

Overall, the main outcomes of the study can be summarized as follows:

- Geodetic receivers are more consistent in data collection compared to smartphones.

- Mounting smartphones on flat, inverted, or inclined platforms has a weak effect on GNSS-IR estimations.
- The most stable data in smartphones is obtained from GPS satellites.
- Using signals with wavelengths shorter than 20 cm in GNSS-IR studies involving smartphones provides better results compared to using all signals.
- Both geodetic receivers and smartphones can be used for detecting reflector height and height changes, and for long-term monitoring.
- The usability of smartphone data for determining reflector height changes highlights a cost-effective alternative for monitoring climatological parameters such as snow depth, sea level, and vegetation height using GNSS-IR. Given their significantly lower cost compared to geodetic receivers, smartphones offer a practical alternative in such studies.

Acknowledgements

This study was conducted as part of the doctoral thesis being prepared by the first author at Yildiz Technical University, Graduate School of Science and Engineering, Department of Geomatic Engineering. And, the study has been supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) within the scope of the Research Support Projects Directorate (ARDEB) under project number 121Y348.

Author Contribution

Cemali Altuntas: Conception, Design, Methodology, Literature review, Analysis, Software, Data collection and processing, Writing. **Nursu Tunalioglu:** Conception, Design, Methodology, Supervision, Analysis, Writing.

Declaration of Competing Interests

The authors declare that they have no known relevant competing financial or non-financial interests that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Altuntas, C., & Tunalioglu, N. (2020). Estimation performance of soil moisture with GPS-IR method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(4), 2217-2230.
- Altuntas, C., & Tunalioglu, N. (2021). Feasibility of retrieving effective reflector height using GNSS-IR from a single-frequency android smartphone SNR data. *Digital Signal Processing*, 112, 103011.
- Altuntas, C., Iban, M. C., Şentürk, E., Durdag, U. M., & Tunalioglu, N. (2022). Machine learning-based snow depth retrieval using GNSS signal-to-noise ratio data. *GPS Solutions*, 26(4), 117.
- Altuntas, C., & Tunalioglu, N. (2023). A systematic approach for identifying optimal azimuth and elevation angle masks in GNSS-IR: validation through a sea level experiment. *GPS Solutions*, 27(4), 198.
- Banville, S., & van Diggelen, F. (2016). Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones, *GPS World*, 27(11), 43-48.

- Besel, C., & Kayikci, E. T. (2021). Investigation of sea level variations in Turkish coasts using GNSS reflectometry (in Turkish). *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 8(1), 1-17.
- Chen, L., Chai, H., Zheng, N., Wang, M., & Xiang, M. (2023). Feasibility and performance evaluation of low-cost GNSS devices for sea level measurement based on GNSS-IR. *Advances in Space Research*, 72(11), 4651-4662.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., & Zavorotny, V. U. (2013). Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: Development of a retrieval algorithm for soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1), 537-543.
- EUSPA. (2024). *EUSPA EO and GNSS Market Report, Issue 2*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- GSA. (2019) *GNSS Market Report, Issue 6*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Hu, Y., Yuan, X., Liu, W., Wickert, J., Jiang, Z., & Haas, R. (2021). GNSS-IR model of sea level height estimation combining variational mode decomposition. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 10405-10414.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J., & Zavorotny, V. U. (2008). Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*, 35(24).
- Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W., & Nievinski, F. G. (2009). Can we measure snow depth with GPS receivers?. *Geophysical research letters*, 36(17).
- Larson, K. M., Löfgren, J. S., & Haas, R. (2013). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in space research*, 51(8), 1301-1310.
- Larson, K. M., & Nievinski, F. G. (2013). GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solutions*, 17, 41-52.
- Liu, Z., Du, L., Zhou, P., Liu, Z., Zhang, Z., & Xu, Z. (2022). Performance assessment of GNSS-IR altimetry using signal-to-noise ratio data from a Huawei P30 smartphone. *GPS Solutions*, 26(2), 42.
- Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, 39, 447-462.
- Nievinski, F. G., & Larson, K. M. (2014). Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation—Part II: Application and validation. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 52(10), 6564-6573.
- Robustelli, U., Baiocchi, V., & Pugliano, G. (2019). Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and positioning performance analysis. *Electronics*, 8(1), 91.
- Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal*, 263, 835-853.
- Strandberg, J., & Haas, R. (2019). Can we measure sea level with a tablet computer?. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(11), 1876-1878.
- Tunalioglu, N., Dogan, A. H., & Durdag, U. M. (2019). Determination of snow depth by GPS signal to noise ratio (in Turkish). *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 6(1), 1-9.
- Williams, S. D., Bell, P. S., McCann, D. L., Cooke, R., & Sams, C. (2020). Demonstrating the potential of low-cost GPS units for the remote measurement of tides and water levels using interferometric reflectometry. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 37(10), 1925-1935.
- Zheng, N., & Chai, H. (2023). Preliminary inquiry on the linear relationship between the height of the station and the ground height error retrieved by GNSS-IR with low-cost smart electronic equipment. *Measurement Science and Technology*, 34(12), 125115.

Ortalama kaydırma algoritması kullanarak küresel radyal tabanlı fonksiyonlar ile bölgesel gravite modellemeleri için veri uyarlamalı ağ tasarımı

Raşit Uluğ^{1*} 

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Merkez, Nevşehir.

Öz: Bu çalışma küresel radyal temel fonksiyonlar (KRTF) ile bölgesel gravite modellemelerinde veri uyarlamalı ağ tasarımı için yeni bir metodoloji sunmaktadır. Önerilen yöntem KRTF merkezlerinin sayısı ve yatay düzlemdeki konumunu belirlemek için ortalama kaydırma algoritması kullanır. Gözetimsiz bir sınıflandırma yöntemi olan ortalama kaydırma algoritmasının temel amacı verilerin benzerlikleri gözeticilerle farklı sınıflara ayrılması olsa bile, kümeleme verilerin mekânsal uzaydaki mesafe ilişkileri gözeticilerle tamamlandığında oluşan küme merkezlerinin veriye uyarlı dağılımında olduğu görülmektedir. Bu özellik ağ kurulumunda büyük bir avantaj sağlar. Ağ kurulumunun tamamlanmasından sonra, her bir KRTF için uygun derinlik genelleştirilmiş çapraz doğrulama ile belirlenmiştir. Derinlik belirlemede sadece seçili KRTF merkezinin etki alanı içinde kalan gözlemler kullanılarak işlem yükü hafifletilmiştir. Alt ve üst derinlik sınırları ampirik sinyal kovaryans fonksiyonu ve ortalama kaydırma algoritmasının parametresi olan pencere boyutu yardımıyla belirlenmiştir. Son olarak seçilen Legendre katsayısının mekânsal uzayda devamlı pozitif olmasından kaynaklanan uzun dalga boylu hataları azaltmak için dönme noktası algoritması kullanılmıştır. Önerilen yöntemin performansının belirlenmesi ve pencere boyutunun ağ üzerine etkisinin belirlenmesi için Colorado alanında simüle edilen gravite bozukluğu verileri kullanılmıştır. Sayısal testlerde uygun pencere boyutunun ağ kurulumu üzerine büyük etkisi olduğu görülmüştür. Uygun pencere boyutunun seçiminde teorik bir yaklaşım sağlanamamasına rağmen, önerilen yöntem ideal ağ kurulumu için sadece bir parametreye ihtiyaç duymaktadır. Sonuç olarak ortalama kaydırma algoritmasının ağ kurulumunda oldukça etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bölgesel gravite modelleme, Veri uyarlamalı ağ tasarımı, Geoit, Ortalama kaydırma kümeleme

A data-adaptive network design using the mean shift algorithm for regional gravity field modeling with spherical radial basis functions

Abstract: This study presents a new methodology to construct a data-adaptive network design for regional gravity field modeling via spherical radial basis functions (SRBFs). The proposed methodology uses mean shift clustering algorithm to determine the number and the horizontal positions of the centers of SRBFs. Although the main purpose of the unsupervised classification mean shift algorithm is to classify the data into different classes by considering their similarities, it is realized that the cluster centers are distributed adaptively to the data when clustering is done by considering the distance relations in the spatial domain. This feature provides a big advantage in the construction of the network. After establishment of the network, the proper depth for each SRBF is determined by the generalized cross-validation technique. In depth determination, the processing load was reduced by using only the observations that fall within the influence area of the selected SRBF center. The upper and lower depth limit is determined with the help of empirical signal covariance function and window size which is the parameter of the mean shift algorithm. Lastly, the long wavelength errors, which occur due to the always positivity of the selected Legendre coefficient in the spatial domain, are reduced by using the turning point algorithm. To test the performance of the proposed methodology and to investigate the effect of window size on the final network, the simulation data set in the Colorado regions is employed. The numerical tests show that the effect of the window size on the final network design is crucial. Even though no theoretical approach can be provided for the selection of the proper value of the window size, the proposed methodology requires only one parameter to construct an optimal network. In conclusion, the mean shift algorithm is a very effective method in the network design.

Keywords: Regional gravity field modeling, Data-adaptive network design, Geoid, Mean shift clustering

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 384 228 1000 (15096)

Geliş Tarihi/Received: 23.05.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 09.08.2024



1. Giriş

Yeryuvarının gravite alanının bölgesel ölçekte modellenmesi matematiksel ve fiziksel yükseklik sistemleri arasındaki ilişkinin kurulması ve yeryuvarının statik ve dinamik hareketlerinin belirlenmesi için büyük önem arz etmektedir. Küresel harmonik (KH) fonksiyonlar gravite alanını modellenmesinde en sık kullanılan yöntemdir. KH fonksiyonlar spektral alanda maksimum lokalizasyon sağlar (Freeden & Schreiner, 2009), fakat mekânsal lokalizasyon özellikleri bulunmamaktadır (Bentel vd., 2013). Yüksek frekanslı gravite sinyallerini içeren yersel, hava ve deniz gravite gözlemlerinin bölgesel olarak yapılabilirdiği göz önüne alındığında, yüksek doğrulukta bölgesel gravite modelleri için mekânsal lokalizasyon sağlayan matematiksel fonksiyonların kullanılması gereklidir. KH'nin aksine hem spektral hem mekânsal uzayda lokalizasyon sağlayabilen küresel radyal tabanlı fonksiyonlar (KRTF) (SRBF: spherical radial basis functions) bölgesel geoit modellemelerinde önemli bir alternatiftir. KRTF'nin etkisi gözlem noktası ve KRTF merkezinin uzaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu özellik KRTF'nin küçük ölçekteki gravite değişimlerini belirleyebilmesini sağlar.

KRTF ile bölgesel gravite modellemelerinde oluşturulan nihai modelin doğruluğu üç parametreye bağlıdır. Bunlar: KRTF merkezlerinin sayısı ve yatay düzlemdeki dağılımını içeren KRTF ağı, merkezlerin referans küre altındaki derinliği ve seri açılımının minimum ve maksimum değerleridir. Bazı çalışmalarda KRTF'de kullanılan Legendre katsayısı türünün de bir parametre olarak ele alındığı görölse de, Tenzer ve Klees (2008) tarafından yapılan çalışmada, uygun derinliklerin belirlendiği durumlarda oluşturulan modellerin doğruluk açısından aynı sonuçları verdiği kanıtlanmıştır. Yüksek doğrulukta bölgesel gravite modelleri için bahsedilen üç parametre en uygun olarak seçilmelidir. Fazla sayıda seçilen KRTF işlem yükünün arttırmasına ve modelin aşırı uyum göstermesine neden olacaktır. Düşük sayıda seçilen KRTF ise gravite sinyalinin yüksek frekanslı bileşenlerini modellemede yeterli olmayacaktır. KRTF merkezlerinin dağılımları ise büyük önem arz etmektedir. Gözlemlerin yatay düzlemdeki dağılımlarının dikkate alınmadığı ızgara ağlarında, KRTF merkezleri verinin olmadığı veya oldukça seyrek olduğu alana yerleştirebilmektedir.

Literatürde bu üç parametrenin ideal değerlerinin belirlenebilmesi için çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Barthelmes (1986) tarafından geliştirilen free-positioned algoritması lineer olmayan optimizasyon kullanılarak uygun ağ ve derinliği belirlemeye çalışır. Lineer olmayan optimizasyon algoritmasının kullanılması nedeniyle ağ tasarımı için gereken süre ve modelin karmaşıklığı artmasına rağmen, gereken KRTF merkez sayısının düşürüldüğü belirtilmiştir. Marchenko (1998) gözlem noktalarının altına yerleştirdiği KRTF merkezlerinin sayısını sequential multiple algoritması kullanarak azaltmıştır. Klees ve Wittwer (2007) tarafından önerilen bir diğer veri uyarlamalı ağ tasarımında başlangıç olarak seçilen ızgara ağına belirli ölçütler değerlendirilerek yeni KRTF merkezleri eklenmiştir. Önerilen yöntemin gereken KRTF sayısını düşürdüğü ve bazı durumlarda en küçük kareler yönteminin çözümünde düzenleştirmeye gerek kalmadığı vurgulanmıştır. Klees vd. (2008) uygun ağ seçimi için veriye dayalı ağ tasarımı yaklaşımı sunmuştur. Bu yöntemde seyrek olarak oluşturulan bir ızgara ağ yardımıyla ilk modelleme yapılır. İlk model sonrası elde edilen gözlem ve kestirilen model arasındaki farkları (artık) küçültmek amacıyla artık değeri en büyük olan gözlem noktalarının altına yeni KRTF merkezleri yerleştirilir. Foroughi ve Tenzer (2014) uygun ağ, derinlik ve düzenleştirme katsayısını eş zamanlı bulabilmek için Levenberg-Marquart optimizasyon algoritmasını kullanmışlardır. Gauss-Newton optimizasyon algoritması kullanarak ağ tasarımı Mahbuby vd. (2021) tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada başlangıç olarak seçilen ızgara ağı, optimizasyon algoritmasıyla veriye uyumlu şekilde yeniden tasarlanmıştır. Uluğ ve Karşlıoğlu (2022a) tarafından k-SRBF yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde gözetimsiz bir sınıflandırma algoritması olan k-ortalama kümeleme sonucu oluşan küme merkezleri, KRTF merkezleri ile değiştirilerek veri dağılımına uygun ağ tasarımı yapılmıştır. k-SRBF yöntemi ile ağ tasarımında gereken parametre sayısının fazla olması nedeniyle, sadece tek bir parametreye ihtiyaç duyan geliştirilmiş bir versiyonu (geliştirilmiş k-SRBF) Uluğ ve Karşlıoğlu (2022b) tarafından sunulmuştur. Geliştirilmiş yöntemde başlangıç olarak tek bir KRTF merkezi alınır. Oluşturulan bu ilk ağ

değiştirilmiş ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) yöntemi kullanılarak bir sonradan işleme sürecine tabi tutulur. Geliştirilmiş k-SRBF yönteminin daha az sayıda KRTF merkezi kullanarak yüksek doğruluğa ulaştığı belirtilmiştir. Fakat sonradan işleme süreci nedeniyle ağ kurulumunda gereken süre nispeten fazladır. Zhang vd. (2024), geliştirilmiş k-SRBF yöntemindeki işlem süresini azaltabilmek için k-ortalama yerine HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) kümeleme algoritmasını önermişlerdir. Yazarlar işlem süresinin %12.5 kısaldığını belirtmişlerdir. Ancak bu çalışmada da HDBSCAN algoritması ile elde edilen küme merkezlerinin doğrudan kullanılamaması nedeniyle bir sonradan işleme süreci bulunmaktadır.

k-ortalama ve HDBSCAN kümeleme algoritmalarının ağ tasarımındaki başarısı, mevcut gözetimsiz sınıflandırma algoritmalarının uygun KRTF ağı kurulumunda kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. İlk kez, bu çalışmada ortalama kaydırma (mean shift) kümeleme algoritması kullanılarak KRTF için veri uyarlamalı ağ tasarımı incelenmiştir. Ortalama kaydırma algoritması k-ortalama küme algoritmasından farklı olarak küme sayısının başlangıçta tanımlanmasına gerek duymaz. Bu özellik oluşturulan ağların sonradan işleme sürecine tabii tutulmadan kullanılabilmesini sağlayabilmektedir. Bu sayede ağ kurulumunda gereken süre ve modelin karmaşıklığı eş zamanlı olarak azaltılabilir. Önerilen yöntem bölgesel gravite modellerinde ilk kez kullanıldığı için ortalama kaydırma algoritmasının parametreleri detaylı olarak incelenmiştir. Sayısal testlerde Colorado alanında elde edilen simülasyon gravite verileri kullanılmıştır. Bu bağlamda metnin kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: 2. bölümde KRTF ile bölgesel gravite modellemesi matematiksel formüller ile verilmiştir. Parametre kestirimi 3. bölümde ele alınmıştır. Önerilen ağ tasarım yöntemi ve uygun derinlik seçimi sırasıyla bölüm 4 ve 5'te açıklanmıştır. Önerilen yöntemin performansı ve ortalama kaydırma algoritmasının parametreleri 6. bölümde irdelenmiştir. Son olarak sonuçlar bölüm 7'de özetlenmiştir.

2. Küresel Radyal Temel Fonksiyonlar ile Bölgesel Gravite Alanı Modelleme

Yersel, hava ve deniz gravimetre gözlemleri yüksek frekanslı gravite sinyallerini sağlar. Fakat gözlemlerin coğrafi olarak sınırlı olması gözlem alanının daha uzun dalga boylu gravite sinyallerinin modellenmesini engeller. Ayrıca gözlemler genellikle ayrı olarak ölçülür, bu nedenle matematiksel modeller ile gravite sinyalinin kısa dalga boylu sinyalleri ölçümlerden elde edemez. Bu sorunların çözümünde en sık kullanılan yöntem ise Kaldır-Hesapla-Yerine Koy tekniğidir. Bu yöntemde gravite sinyalinin uzun dalga boyları bir küresel jeopotansiyel model (KJM) yardımıyla hesaplanır. Gravite sinyalinin kısa dalga boylu bileşenleri ise topoğrafyanın yükseklik bilgisini içeren sayısal yükseklik modelleri (SYM) kullanılarak elde edilir. Hesaplanan uzun ve kısa dalga boyları gravite gözlemlerinden çıkarılarak modellemede kullanılan artık gravite sinyali elde edilir. Kaldır-Hesapla-Yerine Koy tekniği dikkate alınarak artık bozucu potansiyel (T_{art})

$$T_{art} = T - T_{uzun} - T_{kısa} \quad (1)$$

ile gösterilir. Bu eşitlikte T_{uzun} ve $T_{kısa}$ sırasıyla gravite sinyalinin uzun ve kısa dalga boylu bileşenlerini temsil eder. Yeryuvarının üzerindeki herhangi bir $\mathbf{r}_i$ noktası için T_{art} değeri K sayıda KRTF fonksiyonunun lineer birleşimi olarak

$$T_{art}(\mathbf{r}_i) = \sum_{k=1}^K x_k \Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k) \quad (2)$$

ile ifade edilir. Eşitlik 2'de x_k bilinmeyen KRTF katsayılarını, $\Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k)$ ise KRTF çekirdeğini ifade eder. $\mathbf{r}_i$ ve $\mathbf{r}_k$ sırasıyla i noktasındaki gözlem ve k noktasındaki KRTF merkezinin küresel koordinat sistemindeki konumunu temsil eder. Bu noktaların koordinat sisteminin merkezine olan radyal uzaklıkları $r_i = |\mathbf{r}_i|$ ve $r_k = |\mathbf{r}_k|$ eşitlikleri ile ifade edilir. Tenzer ve Klees (2008)'den referans alarak, $\Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k)$ çekirdeğinin matematiksel açılımı

$$\Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k) = \sum_{l=L_{min}}^{L_{maks}} \frac{2l+1}{R} \left(\frac{R}{r_i}\right)^{l+1} \psi_l(\mathbf{r}_k) P_l(\hat{\mathbf{r}}_i^T \hat{\mathbf{r}}_k) \quad (3)$$

olarak yazılır. Eşitlikte yer alan R referans kürenin yarıçapını, P_l ise l derecesindeki Legendre polinomlarını küresel uzaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlar. $\hat{\mathbf{r}}_i$ ve $\hat{\mathbf{r}}_k$ küresel koordinat sisteminde tanımlı birim vektörlerini temsil eder. $\psi_l(\mathbf{r}_k)$ KRTF'nin spektral ve mekânsal alandaki karakteristiğini belirleyen Legendre katsayısıdır. L_{min} ve L_{maks} seri açılımının minimum ve maksimum değerleridir. Eğer $L_{min} = 0$ ve $L_{maks} = \infty$ olarak alınırsa, KRTF bant sınırlı değildir. Diğer tüm durumlarda KRTF bant sınırlı olarak ele alınır. Bazı Legendre katsayıları bant sınırsız formunda analitik olarak ifade edilir. Analitik formulu KRTF'ler işlem hızını arttırmakla birlikte karmaşıklığı azalttığı içi genellikle tercih edilirler (Tenzer & Klees, 2008). Bu çalışmada analitik ifadesi bulunan Poisson çekirdeği Legendre katsayısı olarak seçilmiştir. Poisson çekirdeği açılım derecesi l 'nin bir fonksiyonu olarak

$$\psi_l(\mathbf{r}_k) = R \left(\frac{r_k}{R} \right)^{l+1} \quad (4)$$

ile ifade edilir (Tenzer & Klees, 2008). Eğer, Poisson çekirdeğinin analitik formu kullanılırsa Eşitlik 3 yeniden düzenlenerek Eşitlik 5'e dönüşür (Tenzer & Klees, 2008):

$$\Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k) = r_k \frac{r_i^2 - r_k^2}{(r_i - r_k)^3} \quad (5)$$

Fakat Lin vd. (2019) tarafından yapılan testlerde L_{min} değerinin sıfıra eşitlendiği durumda seçilen Legendre katsayısının mekânsal olarak daima pozitif olması nedeniyle kaçınılmaz uzun dalga boylu hatalara neden olduğu görülmüştür. Lin vd. (2019) bu hatanın azaltılabilmesi için dönme noktası algoritmasını önermişlerdir. Bu algoritmada $L_{min} = 0$ iken uygun ağ ve derinlikler belirlenir. Sonrasında L_{min} değeri belirli aralıklarla artırılarak kontrol noktalarındaki gerçek ölçümler ile kestirilen ölçümler arasındaki farkların karesel ortalama hatası (KOH) hesaplanır. KOH değeri

$$KOH = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (g_j - \hat{g}_j)^2}{J}} \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada g_j ve $\hat{g}_j$, sırasıyla j kontrol noktasındaki gözlenen ve kestirilen artık gravite değerini, J ise kontrol grubundaki toplam gözlem sayısını ifade eder. Başlangıçta KOH sabit iken belirli bir değerden sonra yükselmeye başlar. Uygun L_{min} KOH'un yükselmeye başladığı değer olarak seçilir. Bu tür KRTF'ye indirgenmiş KRTF denir ve Poisson çekirdeği için

$$\Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k) = r_k \frac{r_i^2 - r_k^2}{(r_i - r_k)^3} - \sum_{l=0}^{L_{min}-1} \frac{2l+1}{R} \left(\frac{R}{r_i} \right)^{l+1} \psi_l(\mathbf{r}_k) P_l(\hat{\mathbf{r}}_i^T \hat{\mathbf{r}}_k) \quad (7)$$

olarak tanımlanır. Eşitlik 2'de yer alan x_k bilinmeyen KRTF katsayılarını içerir ve mevcut verilerden kestirilmesi gerekmektedir. Ancak, artık bozucu potansiyel alanı doğrudan gözlemlenemez ve gravite potansiyelinin lineer fonksiyonları yardımıyla elde edilir. Çalışmada kullanılan artık gravite bozukluğu ($\delta g_{art}(\mathbf{r}_i)$) ve artık yükseklik anomalileri ($\zeta_{art}(\mathbf{r}_i)$) ile T_{art} arasındaki ilişki sırasıyla Eşitlik 8 ve 9 ile kurulur:

$$\delta g_{art}(\mathbf{r}_i) = - \frac{\partial T_{art}(\mathbf{r}_i)}{\partial r_i} \quad (8)$$

$$\zeta_{art}(\mathbf{r}_i) = \frac{T_{art}(\mathbf{r}_i)}{\gamma(\mathbf{r}_i')} \quad (9)$$

burada γ normal gravite değerini, $\mathbf{r}_i'$ ise telluroid üzerindeki konum vektörünü temsil eder.

3. Parametre Kestirimi

N sayıda gravite bozukluğu ölçüldüğü varsayılarak, gözlem denklemleri

$$O(\mathbf{r}_i) + e(\mathbf{r}_i) = \mathcal{L}_i T_{art}(\mathbf{r}_i) = \sum_{k=1}^K x_k \mathcal{L}_i \Phi(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k) \text{ ve } i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

ile yazılır. Eşitlikte yer alan $O(\mathbf{r}_i)$ ve $e(\mathbf{r}_i)$, i noktasındaki gözlem ve gözlem hatasıdır. $\mathcal{L}_i$ artık bozucu potansiyel ile artık lineer fonksiyonlar arasındaki ilişkiyi temsil eder. Hataların normal dağılımda ve sıfır ortalaması olduğu varsayılarak, Gauss-Markov modele göre gözlem denklemleri matris formunda

$$\mathbf{l} + \mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad E(\mathbf{e}) = 0 \quad \text{ve} \quad D(\mathbf{e}) = D(\mathbf{l}) = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (11)$$

ile gösterilir. Burada $\mathbf{l}$ gözlem vektörünü, $\mathbf{e}$ gözlem hatalarını içeren vektörü belirtir. $\mathbf{A}$ katsayılar matrisini, $D(\mathbf{e})$ ise öncül varyans faktörü σ_0^2 ve ağırlık matrisi $\mathbf{P}$ 'den oluşan varyans-kovaryans matrisini temsil eder. En küçük kareler yöntemi kullanılarak bilinmeyen katsayılar vektörü $\mathbf{x}$,

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \quad (12)$$

yardımıyla kestirilebilir. Uygun olmayan KRTF ağı, derinlik seçimi veya gözlemlerdeki boşluklar nedeniyle normal denklem matrisinin çözümü mümkün olmayabilir ve bu durumda tekil (*singular*) matris oluşur. Böyle bir durumda sonuca ulaşmak için literatürde sıkça kullanılan Tikhonov düzenileştirmesi uygulanmıştır.

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \lambda \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \quad (13)$$

Eşitlik 13'te $\mathbf{R}$ düzenileştirme matrisini ifade eder ve bu matris, çalışmada birim matris olarak alınmıştır. λ düzenileştirme katsayısıdır ve Koch ve Kusche (2002) ile Kusche (2003) tarafından önerilen varyans bileşeni tahmini (variance component estimation) yöntemiyle bulunmuştur.

4. Ortalama Kaydırma Algoritması Kullanarak Veri Uyarlamalı Ağ Tasarımı

KRTF ile bölgesel gravite modellerinde oluşturulan ağ kritik öneme sahiptir. Yetersiz sayıda KRTF gravite sinyalinin kısa dalga boylu bileşenleri belirlemede başarısız olurken, aşırı sayıda KRTF yerleştirilmesi aşırı uyuma neden olacaktır. Bu nedenle KRTF ağı veri dağılımına uygun olarak dağıtılmış yeterli sayıda merkezden oluşmalıdır. Giriş kısmında bahsedildiği gibi kümeleme algoritmaları ağ kurulumunda kullanılmak için faydalı modeller olabilir. Kümeleme gözlemlerin birbiri ile olan mekânsal uzaklık ilişkisi gözetilerek tamamlanırsa, küme merkezlerinin dağılımı veriye uyarlı olacaktır. Bu kümeleme algoritmalarına en iyi örnek, Ulug ve Karshioğlu (2022b) tarafından kullanılan k-ortalama küme algoritmasıdır. Fakat k-ortalama kümeleme algoritmasında nihai küme sayısının başlangıçta bilinmesi gerekmektedir. KRTF ile oluşturulan ağlarda merkez sayısının tam olarak bilinmemesi nedeniyle, k-SRBF bir sonradan işleme sürecine gerek duyulmaktadır. Diğer yandan, k-ortalama küme algoritmasından farklı olarak ortalama kaydırma kümeleme algoritması nihai küme sayısının bilinmesine ihtiyaç duymaz. Bu sonradan işleme sürecini ortadan kaldırmak için büyük bir avantaj olarak kullanılabilir.

Fukunaga ve Hostetler (1975) tarafından geliştirilen ortalama kaydırma, parametrik olmayan ve yoğunluğa bağlı bir gözetimsiz sınıflandırma algoritmasıdır. Bu algoritma dağılımın en yüksek olduğu yeri bulmayı amaçlar. Algoritmanın çalışma prensibi aşağıdaki maddeler de özetlenmiştir:

1. Öncelikle her gözlem noktası bir küme merkezi olarak değerlendirilir.
2. Her bir gözlem noktası için bir önceden tanımlı bir pencere boyutu (b) içinde kalan tüm gözlemlerin merkezi seçilen çekirdek kullanılarak ağırlıklı olarak hesaplanır.
3. Eski küme merkezleri hesaplanan yeni küme merkezlerine kaydırılır.

4. 2 ve 3 numaralı adımlar küme merkezlerinde bir değişim olmayana kadar tekrar edilir.
5. Çakışan küme merkezleri olursa gözlem sayısı en yüksek olan kabul edilir ve diğer küme silinir.

Yukarıdaki işlem adımlarından da anlaşılacağı gibi b , kümeleme sonucunu etkileyen en önemli parametredir. Pencere boyutu aynı zamanda komşu KRTF merkezleri arasındaki en kısa uzaklığın bir diğer tanımı olarak düşünülebilir, çünkü bir küme merkezi için b içinde kalan bütün veriler bu kümenin bir elemanı olacaktır. Bu nedenle bu kümeye komşu olan en yakın küme merkezi en az b mesafesinde olacaktır. Ancak bu parametrenin uygun değerinin belirlenmesi için herhangi bir teorik yaklaşım bulunmamaktadır. Bilinen en iyi yaklaşım belli aday değerler için çapraz doğrulama değeri en düşük olanı seçmektir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken parametre ise küme merkezinin hesaplanmasında verilerin merkeze olan uzaklığının ağırlıklandırılmasıdır. Literatürde genellikle Gaussian çekirdeği tercih edilir. Başlangıç olarak z merkezli bir küme için, Gaussian çekirdeği b 'nin bir fonksiyonu olarak $\mathcal{H}(z_i - z) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z_i - z}{b}\right)^2}$ tanımlanır. Bu durumda Gaussian çekirdeği için bir kümenin ağırlıklı merkezi ($m(z)$)

$$m(z) = \frac{\sum_{z_i \in F(z)} \mathcal{H}(z_i - z) z_i}{\sum_{z_i \in F(z)} \mathcal{H}(z_i - z)} \quad (14)$$

Eşitliği kullanılarak hesaplanır (Fukunaga & Hostetler, 1975). Burada $F(z)$, z 'nin $\mathcal{H}(z_i - z) \neq 0$ olduğu komşularını temsil eder. $m(z) - z$ ortalama kaydırma olarak tanımlanır ve $m(z)$ yakınsayana kadar tekrarlama devam eder.

5. Derinlik Seçimi

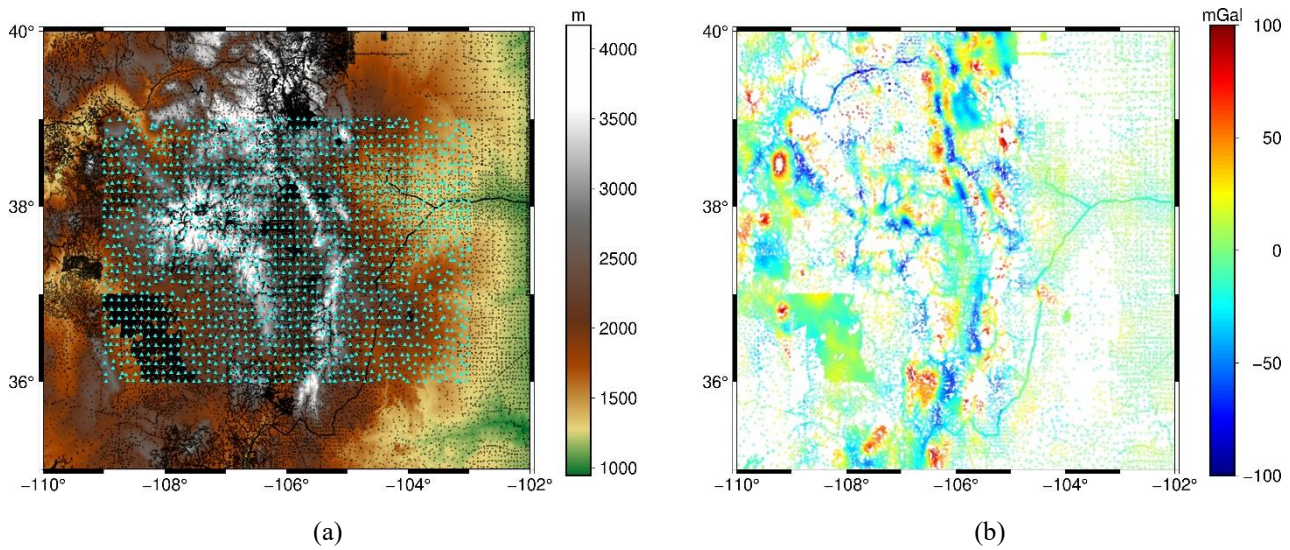
Ortalama kaydırma sonrası elde edilen küme merkezleri KRTF merkezleri ile değiştirildikten sonra uygun derinlik seçimi başlayabilir. Derinlik nihai modelin doğruluğa büyük etkisi olan bir diğer parametredir. Düşük seçilen derinlik uzun dalga boylarını tespit edemezken, yüksek seçilen derinlik değeri de komşu KRTF merkezlerinin birbiri üstüne binmesine neden olacaktır. Uygun derinlik seçimi için genelleştirilmiş çapraz doğrulama (GÇD) (Golub vd., 1979) kullanılması Klees ve Wittwer (2007) tarafından önerilmiştir. GÇD yöntemi

$$GÇD(d) = \frac{\|A\hat{x}^d - I\|_P^2}{[I - \text{tr}(Q^d)]^2} \quad (15)$$

eşitliği ile tanımlanabilir. Burada $\hat{x}^d$ seçilen bir derinlik d için kestirilen katsayıları temsil eder. I gözlem sayısını, Q^d ise $A\hat{x}^d = Q^d I$ olarak tanımlanan etki matrisi olarak adlandırılır. Uygun derinlik değeri üst ($d_{üst}$) ve alt (d_{alt}) sınırlar içerisindeki aday değerler arasındaki GÇD'nin en düşük olduğu değer olarak seçilebilir. Bu nedenle $d_{üst}$ ve d_{alt} sınır değerlerinin elverişli olarak seçilmesi önemlidir. Çalışmada derinlik sınırları Uluğ ve Karşlıoğlu (2022b) tarafından önerilen teorik yaklaşımla belirlenmiştir; d_{alt} derinliğin KRTF'nin mekânsal bant genişliğinin ampirik sinyal kovaryans fonksiyonun korelasyon uzunluğuna eşit olduğu, $d_{üst}$ ise derinliğin ampirik sinyal kovaryans fonksiyonu ve b toplamının korelasyon uzunluğuna eşit olduğu değer olarak belirlenmiştir. Uygun derinlik sınırları seçildikten sonra ilk KRTF ile işleme başlanmıştır. d_{alt} ve $d_{üst}$ arasında 1 km'lik artışlarla GÇD değerleri hesaplanır. Hesaplamada sadece seçili KRTF'nin etki alanı içinde kalan gözlemler kullanılır. Elverişli derinlik belirlendikten sonra seçili KRTF'nin katkısı etki alanı içindeki gözlemlerden çıkarılır. Etki alanı seçili KRTF'nin tesir edebileceği bütün gözlemleri içerecek büyüklükte olmalıdır. Etki alanının ampirik sinyal kovaryans fonksiyonun iki veya daha fazla katı olarak belirlenmesi Klees vd. (2008) tarafından önerilmiştir.

6. Sayısal Testler

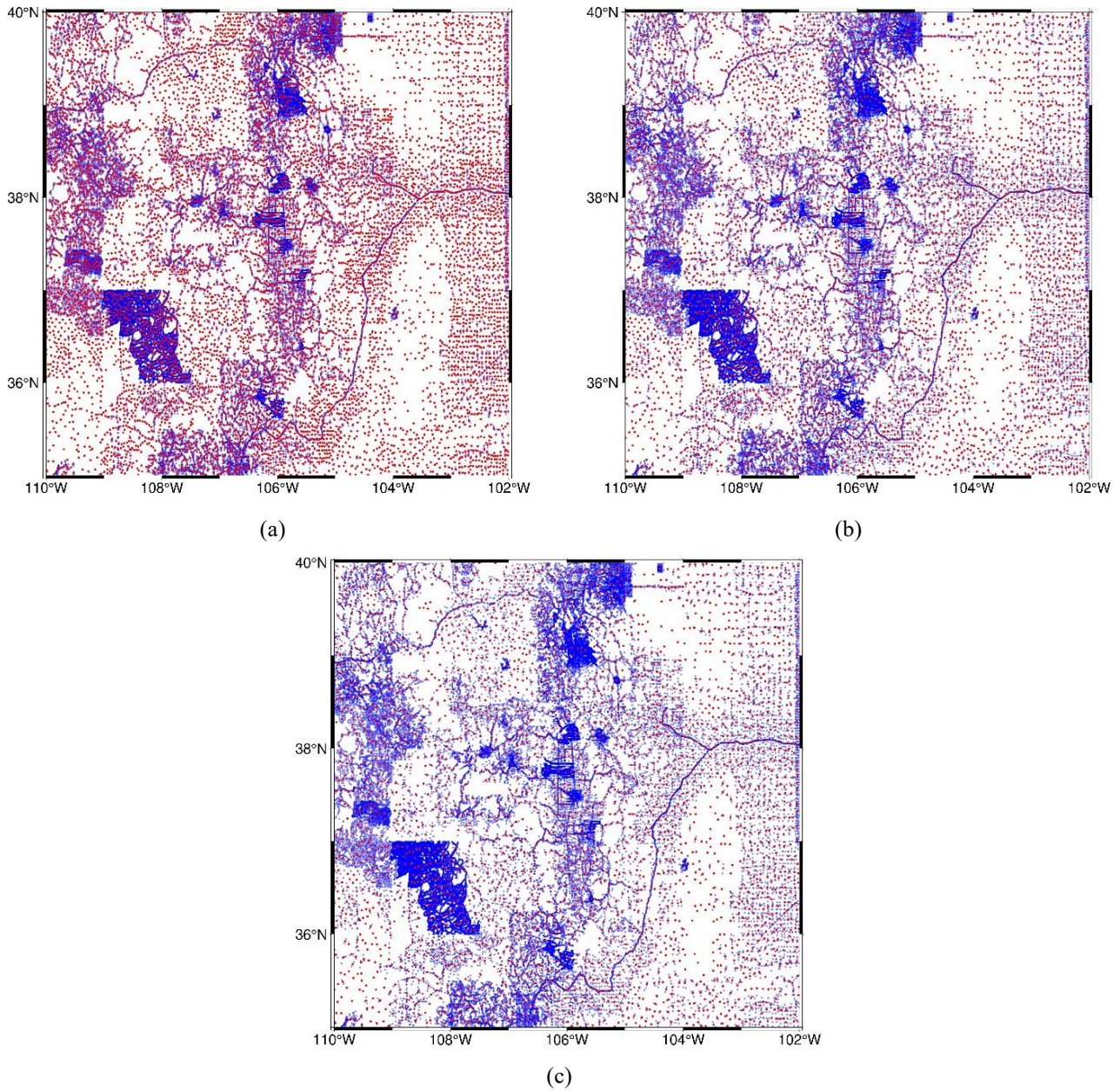
Pencere genişliğinin model üzerine etkisinin belirlenmesi için Colorado alanında gerçek yersel gravite gözlemlerinin konumları kullanılarak artık gravite bozukluğu simüle edilmiştir. Her ne kadar sayısal testlerde gerçek veri seti kullanılmak istense de Colorado veri setindeki yersel gözlemlerin doğruluklarının tam olarak bilinmemesi sağlıklı bir karşılaştırmayı engeller. Ayrıca bu veri setinde kontrol verisi sağlayan yükseklik anomali noktaları gözlem alanının sadece en iç kısmındadır. İlgili alanın karakteristik yapısını temsil edemeyen bu heterojen dağılım, oluşturulan modellerin doğrulukları hakkında yanlış bilgilere neden olabilir. Bu nedenle kontrol noktalarının ilgi alanı üzerinde olabildiğince homojen olarak dağıldığı ve gözlemlerin doğruluğunun bilindiği simülasyon veri kullanımı daha makul olacaktır. Diğer yandan simüle veriler genellikle KJM kullanılarak üretilir. Yüksek seri açılımına sahip KJM'ler mevcut olsa bile, yersel gravite verilerinin sağlayabildiği çok yüksek frekanslı gravite sinyallerini içermezler. Bu simüle veri kullanımının dezavantajı olarak düşünülebilir. Ancak yeni algoritmaların test edilmesinde oldukça sık kullanılan ve kabul gören bir yöntemdir. Colorado veri seti -110° D ile -102° D ve 35° K ile 40° K arasında 59303 ham gravite gözlemlerinden oluşur (Wang vd., 2021). Fakat veri seti aynı istasyonda farklı ölçümler barındırmaktadır. Aynı noktada farklı ölçüm değerleri içeren gözlemler silindikten sonra 58138 nokta kullanılmıştır. Uygun L_{min} belirlenmesi ve dış kontrol için 1489 gözlem kontrol noktası olarak veriden çıkarılmıştır. Gözlem alanı sınırlarında oluşması muhtemel kenar etkilerini azaltmak için, ilgi alanı gözlem alanından 1° küçük seçilmiştir. İlgili alanı içinde seçilen kontrol noktalarının dağılımının olabildiğince homojen olmasına dikkat edilmiştir. Modelde kullanılan gözlem noktalarında XGM2019e KJM (Zingerle vd., 2020) yardımıyla 361. dereceden 2159° u dereceye kadar gravite bozukluğu değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan gravite bozukluğu gözlemlerine sıfır ortalamalı 2.0 mGal standart sapmaya (SS) sahip beyaz gürültü eklendikten sonra istatistiki değerleri; en az -97.14 mGal, en çok 139.60 mGal, ortalama -7.45 mGal ve SS 24.43 mGal olarak elde edilmiştir. Kontrol noktalarında ise aynı model kullanılarak aynı dereceler arasında hatasız artık gravite bozukluğu ve artık yükseklik anomalisi değerleri hesaplanmıştır. Şekil 1a'da modellemede kullanılacak gözlem noktalarının ve kontrol noktalarının yatay düzlemdeki dağılımı görülebilir. Şekilden de görülebildiği gibi gözlem noktaları bazı alanlarda yoğunlaşırken bazı bölgelerde oldukça seyrekler. Bu tür yüksek derecede heterojen dağılıma sahip veri setinde dağılıma uygun ağ tasarımının önemi anlaşılmaktadır. Şekil 1b simüle edilen artık gravite bozukluklarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi özellikle dağlık bölgelerde gözlemlerin varyasyonu artmaktadır. Bu, yüksek doğrulukta bölgesel gravite modellemeyi daha zorlu hale getirir.



Şekil 1: (a) Modellemede kullanılan gözlemler (siyah noktalar), kontrol noktaları (açık mavi üçgenler), (b) artık gravite bozuklukları

Seçilen b 'nin nihai ağ üzerine etkisinin belirlenebilmesi için 3 farklı değer test edilmiştir. Bu değerler 0.02° , 0.03° ve 0.04° 'tür. Kümelemede gözlemler arasındaki Öklid uzakları kullanılır, bu nedenle gözlemlerin konumları küresel sistemden

Kartezyen sisteme dönüştürülmelidir. Kümelemenin tamamlanmasından sonra elde edilen küme merkezlerinin koordinatları tekrar küresel koordinatlara dönüştürülür. Şekil 2’de farklı b seçimlerinin oluşturduğu küme merkezlerinin dağılımı gösterilmektedir. Alt şekillerden de anlaşılabileceği gibi, seçilen her b için ortalama kaydırma algoritması ile elde edilen küme merkezleri veri dağılımına uygun olarak yerleştirilmiştir. Gözlemlerin yoğun olduğu bölgelerde KRTF merkez sayısı fazla iken, verinin seyrek olduğu yerlerde KRTF sayısı da azdır. Gözlemlerin bulunmadığı bölgelerde ise herhangi bir KRTF merkezi yerleştirilmemiştir. Şekil 2 ortalama kaydırma algoritması kullanılarak kurulan KRTF ağının ızgara ağı üzerindeki üstünlüğünü açıkça göstermektedir. Oluşturulan ağlardaki toplam KRTF sayısı Tablo 1’de özetlenmiştir. Tablodan açıkça görüldüğü b ’nin KRTF sayısı üzerine etkisi çok yüksektir. b ’nin 0.03° ’ten 0.02° ’ye düşürülmesi, KRTF sayısının yaklaşık %83 artışına sebep olmuştur. Benzer şekilde b ’nin 0.03° ’ten 0.02° ’ye indirgenmesiyle KRTF sayısı ~%66 oranında artış göstermiştir. Bu değerler uygun b seçilmesinin önemini açıkça vurgulamaktadır.



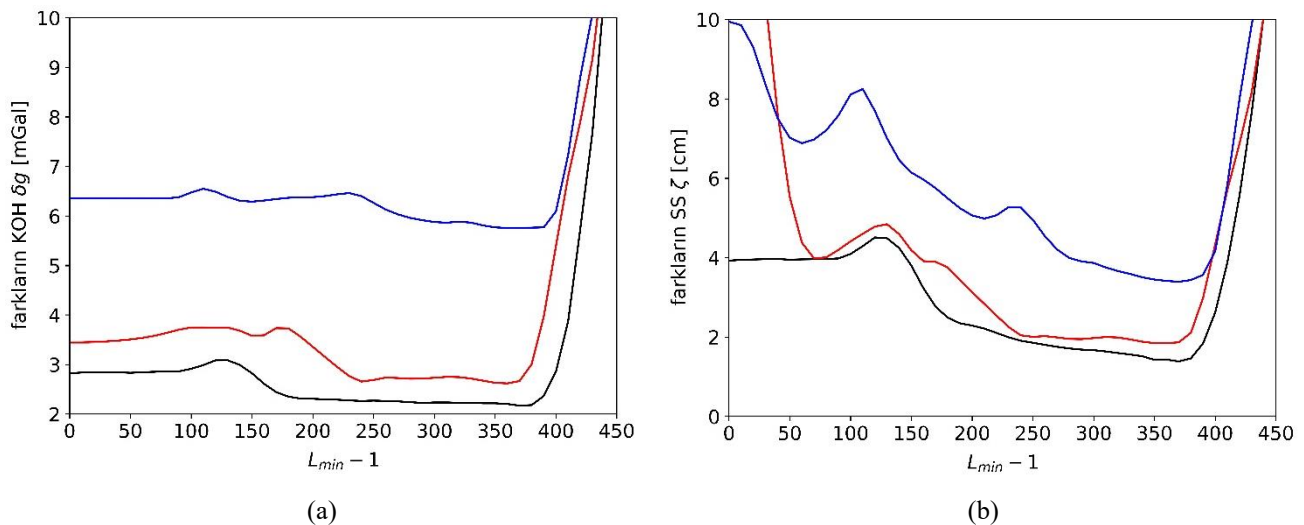
Şekil 2: Gözlemlerin (mavi noktalar) ve KRTF merkezlerinin (kırmızı noktalar) yatay düzlemdeki dağılımları (a) $b = 0.02^\circ$ (b) $b = 0.03^\circ$ ve (c) $b = 0.04^\circ$

Tablo 1: b 'ye bağlı olarak oluşan KRTF sayısı, uygun L_{min} değerleri ve bu değerlerdeki normal denklem matrisinin kondisyon numarası

	$b = 0.02^\circ$	$b = 0.03^\circ$	$b = 0.04^\circ$
KRTF sayısı	10213	5583	3371
L_{min}	381	371	391
Kondisyon numarası	3.1×10^{19}	2.9×10^{13}	5.7×10^{10}

Ağ kurulumunun tamamlanmasından sonra, uygun derinlik seçimi başlatılır. Derinlik seçiminde küresel yaklaşıma (Moritz, 1980) dayanarak, bir D derinliğinde olan KRTF merkezinin radyal uzaklığı $R - D$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde H yüksekliğinde bulunan bir gözlem noktasının radyal uzaklığı ise $R + H$, eşitliği ile bulunmuştur. Referans kürenin yarıçapı 6371 km olarak seçilmiştir. Test alanındaki verilerin ampirik sinyal kovaryans fonksiyonunun korelasyon uzunluğu 0.134° olarak hesaplanmıştır. Bu korelasyon değerine karşılık gelen $d_{üst}$ her b için 27 km iken, d_{alt} 0.02° , 0.03° ve 0.04° için sırasıyla 32 km, 34 km ve 36 km'dir. Etki alanı ampirik sinyal kovaryans fonksiyonunun iki katından yüksek olarak 0.3° seçilmiştir. Tüm KRTF noktaları için ideal derinlik belirlenmesinden sonra son işlem adımı olarak uygun L_{min} değerlerinin belirlenmesi için dönme noktası algoritması kullanılır. Bunun için L_{min} başlangıç değeri 1 olarak seçilir ve $10'$ ar artışlarla 451'e kadar artırılır. Her bir L_{min} değeri için oluşturulan normal denklem matrisinin kondisyon numarası hesaplanır. Eğer normal denklem matrisinin kondisyon numarası yuvarlama hatasından (ε^{-1}) (IEEE 754 çift duyarlıklı format için 4.5×10^{15}) büyükse, matrisin tersi alınırken bütün anlamlı sayılar kaybedilir (Klees vd., 2018) ve bu nedenle bir düzenleştirmeye ihtiyaç duyulur. Bu nedenle normal denklem matrisinin kondisyon numarası ε^{-1} büyükse bilinmeyen KRTF katsayıları Eşitlik 13 yardımıyla hesaplanır. Diğer tüm durumlarda Eşitlik 12 kullanılır. Parametre kestirimi tamamlandıktan sonra, artık gravite bozukluğu kontrol noktalarında KHO hesaplanmıştır.

Artık gravite bozukluğu kontrol noktalarında hesaplanan gözlem ve kestirilen model farklarının SS'i ve artık yükseklik anomali noktalarında hesaplanan gözlem ve kestirilen model farklarının KOH'ları $L_{min} - 1$ 'in fonksiyonu olarak Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dönme noktası algoritması yükseklik anomali kontrol noktalarında santimetre düzeyinde iyileştirme sağlamaktadır ve bu uygun L_{min} değerinin seçiminin önemini vurgulamaktadır. Aynı zamanda ideal L_{min} değeri için artık gravite bozukluğu kontrol noktalarında hesaplanan farkların KOH'larında da düşüş görülmektedir. Her bir b için seçilen L_{min} değeri ve bu değerdeki normal denklem matrisinin kondisyon numarası Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi sadece $b = 0.02^\circ$ olduğu durumda normal denklem matrisinin kondisyon numarası ε^{-1} 'den büyüktür.



Şekil 3: (a) Gravite bozukluğu kontrol noktalarında $L_{min} - 1$ 'e göre hesaplanan farkların KOH değerleri, (b) yükseklik anomali kontrol noktalarında $L_{min} - 1$ 'e göre hesaplanan farkların SS değerleri (siyah çizgiler: $b = 0.02^\circ$, kırmızı çizgiler: $b = 0.03^\circ$, mavi çizgiler $b = 0.04^\circ$)

Tablo 2’de kontrol noktalarında kestirilen modeller ile gözlem modelleri arasındaki farkların istatistiksel değerleri özetlenmiştir. Beklendiği gibi KRTF sayısının artmasıyla modelin doğruluğu artmaktadır. $b = 0.02^\circ$ için artık gravite bozukluğu kontrol noktalarında farkların KOH’u 2.182 mGal’dır. Bu değer gözlemlere eklenen 2.0 mGal hataya oldukça yakındır. Yükseklik anomali kontrol noktalarında ise en yüksek doğruluk olan 1.5 cm SS’e ulaşmıştır. En kötü sonuçlar $b = 0.04^\circ$ değerinde elde edilmiştir. Yükseklik anomali noktalarında 3.6 cm SS doğrulukta iken, gravite bozukluğu kontrol noktalarında 5.8 mGal KOH’a ulaşmıştır. Şekil 2c’den de görüldüğü gibi KRTF merkezlerinin yetersiz oluşu bu sonucun temel nedenidir. Kontrol noktalarındaki hesaplanan KOH ve SS, $b = 0.02^\circ$ için elde edilen değerlerin iki katından fazladır. Kontrol noktalarındaki en iyi sonuç $b = 0.02^\circ$ değeri için elde edilse bile, $b = 0.03^\circ$ değeri ile gravite bozukluğu kontrol noktalarındaki fark sadece 0.5 mGal ve yükseklik anomali kontrol noktalarında fark sadece 0.4 cm’dir. Bu ihmal edilebilir farklarla birlikte, Tablo 1’den de görüldüğü gibi $b = 0.03^\circ$ değeri için normal denklem matrisi herhangi bir düzensizleştirmeye ihtiyaç duymaz. Bu nedenlerden dolayı $b = 0.03^\circ$ değeri test alanı için en ideal değer olarak seçilebilir.

Tablo 2: 1489 kontrol noktasındaki model ve gözlemler arasındaki farkların istatistikleri

b	Δg (mGal)				
	Min.	Maks.	Ort.	SS	KOH
0.02°	-16.97	17.96	-0.07	2.18	2.18
0.03°	-16.59	29.61	0.01	2.67	2.67
0.04°	-30.21	48.25	-0.22	5.77	5.77
b	ζ (cm)				
	Min.	Maks.	Ort.	SS	KOH
0.02°	-12.00	9.98	-0.02	1.46	1.46
0.03°	-11.39	21.63	0.00	1.87	1.87
0.04°	-19.61	27.67	-0.01	3.57	3.57

7. Sonuçlar

Gözetimsiz sınıflandırma algoritmalarının temel amacının verilerin benzerlikleri gözetilerek farklı sınıflara ayırmak olsa bile, kümeleme sonrası oluşan küme merkezlerinin veri dağılımına uygun olması nedeniyle KRTF için bir ağ tasarımı kullanılabileceği görülmüştür. [Uluğ ve Karshoglu \(2022a, b\)](#) k-ortalımalı kümeleme algoritmasını kullanarak veri dağılımını dikkate alan bir ağ tasarım metodolojisi geliştirmişlerdir. Fakat kümeleme sonrası oluşan merkezlerin doğrudan kullanılamaması nedeniyle, bu metodolojide bir sonradan işleme süreci gerekmektedir. Bu çalışmada k-ortalımalı kümeleme algoritmasından farklı olarak, ilk kez ortalama kaydırma algoritması kullanılmıştır. Ortalama kaydırma algoritmasında nihai küme sayısının başlangıçta bilinmesine ihtiyaç duymaması en önemli avantajlarından biri olarak görülür. Bu özellik küme merkezlerin doğrudan kullanılmasını sağlar ve sonradan işleme sürecini ortadan kaldırır. Ortalama kaydırma algoritmasında pencere boyutu (b) kümeleme sonucu doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Bu nedenle sayısal testlerde b ’nin nihai ağ üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Sayısal testler Colorado alanında gerçek gözlemlerin konumları kullanılarak simüle edilen artık gravite bozukluğu gözlemleri ile tamamlanmıştır. Uygun derinlik seçimi GÇD yöntemi kullanılarak, her bir KRTF için sadece etki alanındaki gözlemler yardımıyla bulunmuştur. Alt ve üst derinlik sınırlarının ($d_{üst}$ ve d_{alt}) belirlenmesinde gözlemlerin ampirik sinyal kovaryans fonksiyonu ve b değerlendirilmiştir. Seçilen Legendre katsayısının (Poisson çekirdeği) $L_{min} = 0$ iken mekânsal uzayda daima pozitif olması nedeniyle ortaya çıkan uzun dalga boyu hataları, dönme noktası algoritması kullanılarak azaltılmıştır.

Sayısal testlerde de açıkça görüldüğü gibi ağ kurulumunda b ’nin uygun seçimi büyük önem taşımaktadır. Sadece 0.01° ’lik

değişimler KRTF sayısının %66 ve %83 oranında değişmesine neden olur. Fakat ortalama kaydırma algoritmasının temelinde olduğu gibi KRTF ağ kurulumu için de ideal b seçimi için teorik bir yaklaşım bulunmamaktadır. Uygun b , farklı değerlerin test edilmesiyle bulunabilir. Ancak, ideal ağ kurulumu için sadece bir parametrenin uygun değerinin belirlenmesi ortalama kaydırma algoritmasının avantajını ortaya koymaktadır. Yapılan testlerde sayısal olarak en iyi sonuçlar $b = 0.02^\circ$ için elde edilirken, $b = 0.04^\circ$ istatistiki olarak en kötü sonuçları vermiştir. $b = 0.03^\circ$ değeri en iyi ikinci sonucu vermiştir ve $b = 0.02^\circ$ ile arasındaki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte $b = 0.03^\circ$ değerinde normal denklem matrisinin kondisyon numarası ε^{-1} küçüktür ve en küçük kareler çözümü bir düzenleştirmeye ihtiyaç duymaz. Tüm sonuçlar ortalama kaydırma algoritmasının KRTF için ağ kurulumunda oldukça kullanışlı bir metodoloji sunduğunu kanıtlamaktadır.

Önerilen yöntemin uygulamalarda da büyük bir avantaj sağlayabileceği düşünülmektedir. Ülkemiz gibi genellikle dağlık bölgelerden oluşan coğrafyalarda ulaşım nedeniyle yersel gravite gözlemleri seyrek olarak bulunmaktadır. Bununla birlikte farklı zamanlarda aynı bölgelerde yapılan gözlemler nedeniyle bazı alanlar daha fazla gravite gözlemine sahip olabilmektedir. Heterojen veri dağılımının olduğu benzer durumlarda ortalama kaydırma algoritması kullanılarak bölgesel veya ülke bazında yüksek doğruluklu geoit modelleri daha az sayıda ve uygun olarak yerleştirilmiş KRTF merkezi kullanılarak oluşturulabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Barthelmes, F. (1986). Untersuchungen zur Approximation des äußeren Gravitationsfeldes der Erde durch Punktmassen mit optimierten Positionen. [Dissertation, Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde 92 Zentralinstitut für Physik der Erde. Potsdam: Akademie der Wissenschaften der DDR]. In *Zentralinstituts Physik der Erde*.
- Bentel, K., Schmidt, M., & Gerlach, C. (2013). Different radial basis functions and their applicability for regional gravity field representation on the sphere. *GEM - International Journal on Geomathematics*, 4(1), 67–96.
- Foroughi, I., & Tenzer, R. (2014). Assessment of the direct inversion scheme for the quasigeoid modeling based on applying the Levenberg-Marquardt algorithm. *Applied Geomatics*, 6(3), 171–180.
- Freeden, W., & Schreiner, M. (2009). *Spherical Functions of Mathematical Geosciences*. Springer Berlin Heidelberg.
- Fukunaga, K., & Hostetler, L. (1975). The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *IEEE Transactions on Information Theory*, 21(1), 32–40.
- Golub, G. H., Heath, M., & Wahba, G. (1979). Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter. *Technometrics*, 21(2), 215.
- Klees, R., Slobbe, D. C., & Farahani, H. H. (2018). How to deal with the high condition number of the noise covariance matrix of gravity field functionals synthesised from a satellite-only global gravity field model? *Journal of Geodesy*, 1–16.
- Klees, R., Tenzer, R., Prutkin, I., & Wittwer, T. (2008). A data-driven approach to local gravity field modelling using spherical radial basis functions. *Journal of Geodesy*, 82(8), 457–471.
- Klees, R., & Wittwer, T. (2007). A data-adaptive design of a spherical basis function network for gravity field modelling. *International Association of Geodesy Symposia*, 130, 322–328.
- Koch, K. R., & Kusche, J. (2002). Regularization of geopotential determination from satellite data by variance components. *Journal of Geodesy*, 76(5), 259–268.
- Kusche, J. (2003). A Monte-Carlo technique for weight estimation in satellite geodesy. *Journal of Geodesy*, 76(11–12), 641–652.
- Lin, M., Denker, H., & Müller, J. (2019). A comparison of fixed- and free-positioned point mass methods for regional gravity field modeling. *Journal of Geodynamics*, 125, 32–47.
- Mahbuby, H., Amerian, Y., Nikoofard, A., & Eshagh, M. (2021). Application of the nonlinear optimisation in regional gravity field

- modelling using spherical radial base functions. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 65.
- Marchenko, A. N. (1998). *Parameterization of the Earth's gravity field: point and line singularities*. Lviv Astronomical and Geodetical Society.
- Moritz, H. (1980). Advanced physical geodesy. *Advances in Planetary Geology*.
- Tenzer, R., & Klees, R. (2008). The choice of the spherical radial basis functions in local gravity field modeling. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52(3), 287–304.
- Ulug, R., & Karşlıoğlu, M. O. (2022a). A new data-adaptive network design methodology based on the k-means clustering and modified ISODATA algorithm for regional gravity field modeling via spherical radial basis functions. *Journal of Geodesy*, 96(11), 91.
- Ulug, R., & Karşlıoğlu, M. O. (2022b). SRBF_Soft: a Python-based open-source software for regional gravity field modeling using spherical radial basis functions based on the data-adaptive network design methodology. *Earth Science Informatics*, 15(2), 1341–1353.
- Wang, Y. M., Sánchez, L., Ågren, J., Huang, J., Forsberg, R., Abd-Elmotaal, H. A., Ahlgren, K., Barzaghi, R., Bašić, T., Carrion, D., Claessens, S., Erol, B., Erol, S., Filmer, M., Grigoriadis, V. N., Isik, M. S., Jiang, T., Koç, Ö., Krcmaric, J., Li, X., Liu Q., Matsuo K., Natsiopoulos, D. A., Novák, P., Pail, R., Pitoňák, M., Schmidt, M., Varga, M., Vergos, G. S., Véronneau, M., Willberg, M., & Zingerle, P. (2021). Colorado geoid computation experiment: overview and summary. *Journal of Geodesy*, 95(12), 127.
- Zhang, F., Liu, H., & Wen, H. (2024). A data-adaptive network design for the regional gravity field modelling using spherical radial basis functions. *Geodesy and Geodynamics*, April, 1–8.
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7), 66.

VMF veri sunucusundan türetilen grid bazlı VMF3 ve GPT3 troposfer modellerinin karşılaştırılması: Avrupa bölgesi için bir çalışma

Ali Utku Akar^{1*} , Cevat İnal¹ 

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, Türkiye.

Öz: Toplam Zenit Gecikmesi (ZTD), elektromanyetik sinyallerin doğruluğunu etkileyen önemli bir faktör olduğundan Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), jeodezi ve haritacılık, hava durumu tahminleri ve astronomik gözlemler gibi yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için belirlenmesi gerekir. Gecikme etkisi, yüzey meteorolojik parametrelerine dayanan geleneksel troposfer modelleriyle tahmin edilebilir. Meteorolojik verilerin birtakım çevresel ve ekonomik hususlar nedeniyle yerinde gözlemlerden elde edilememesi ve ilgili modellerdeki içsel modelleme hataları dikkate alındığında, bu yaklaşımların veri işleme süreçlerinde doğru sonuçları sağlaması zorlaşmaktadır. Bir çözüm olarak, Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi'nden (ECMWF) sürekli güncellenen Sayısal Hava Tahminleri (NWP) verilerine dayalı Vienna İz Düşüm Fonksiyonu (VMF) veri sunucusu; ayrık ve ampirik olmak üzere iki farklı modelden troposferik ürünler sağlamaktadır. Ayrıca, bu sunucuda, referans istasyonlarındaki yerinde gözlemlerle elde edilen saha bazlı (site-wise) ZTD'ler doğrudan, istasyonların bulunmadığı rastgele konumlardaki ZTD'lerin kestirimi için grid bazlı (grid-wise) veriler kullanıcılara sunulmaktadır. Bu çalışma, VMF veri sunucusu tarafından türetilmiş grid Viyana İz Düşüm Fonksiyonu-3 (VMF3) ve Global Basınç ve Sıcaklık-3 (GPT3) troposfer modellerinin ZTD kestirimindeki performansının karşılaştırmalı analizine odaklanmıştır. Avrupa Bölgesi'nden seçilmiş rastgele konumlardaki referans noktaları üzerinden uygulama gerçekleştirilmiş olup modellerden elde edilen günlük ZTD'ler değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, VMF3 modelinin 0.7-1.1 cm arasında değişen Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri ile ZTD'yi kestirdiğini, bu hata değerlerinin GPT3 modeli için 3.2-5.0 cm arasında olduğunu göstermiştir. Genel olarak, VMF3'ün GPT3 modeline kıyasla ZTD kestirimindeki yeteneğinin daha yüksek olduğu söylenebilir. Yerinde gözlemlerin mümkün olmadığı ya da saha bazlı ürünlere ait veri arşivinin olmadığı konumlar için ZTD'nin belirlenmesinde grid bazlı VMF3'ün destekleyici bir model olarak kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

Anahtar Sözcükler: GNSS, Toplam Zenit Gecikmesi (ZTD), Viyana İz Düşüm Fonksiyonu-3 (VMF3), Global Basınç ve Sıcaklık-3 (GPT3), Troposferik Modeller

Comparison of the grid-wise VMF3 and GPT3 troposphere models derived from the VMF data server: A study for the European region

Abstract: The Zenith Total Delay (ZTD) must be determined for applications requiring high accuracy, such as Global Navigation Satellite Systems (GNSS), geodesy and cartography, weather forecasting, and astronomical observations, as it is a significant factor affecting the accuracy of electromagnetic signals. The delay effect can be predicted with traditional troposphere models based on surface meteorological parameters. Due to certain environmental and economic factors, meteorological data cannot always be obtained from in-situ observations. Furthermore, considering the inherent modeling errors in these approaches, it becomes challenging to obtain accurate results in data processing procedures. As a solution, the Vienna Mapping Functions (VMF) data server, based on continuously updated Numerical Weather Prediction (NWP) data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), provides tropospheric products from two different models: discrete and empirical. Additionally, this server offers site-wise ZTDs directly derived from in-situ observations at reference stations, as well as gridded data for predicting ZTDs at random locations where stations are not present. This study focuses on comparative analysis of the performance of grid-wise Vienna Mapping Function-3 (VMF3) and Global Pressure and Temperature-3 (GPT3) tropospheric models in predicting ZTDs derived from the VMF data server. The application was conducted over randomly selected reference points in the European region, and the daily ZTDs obtained from the models were evaluated. The study results have shown that the VMF3 model predicts ZTD with Root Mean Square Error (RMSE) values ranging from 0.7 to 1.1 cm, while these error values range from 3.2 to 5.0 cm for the GPT3 model. Generally, it can be said that VMF3 exhibits higher capability in predicting ZTD compared to the GPT3 model. It can be concluded that grid-wise VMF3 can be used as a supportive model for determining ZTD in locations where in-situ observations are not possible or where there is no data archive for site-wise products.

Keywords: GNSS, Zenith Total Delay (ZTD), Vienna Mapping Function-3 (VMF3), Global Pressure and Temperature-3 (GPT3), Tropospheric Models

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 332 205 1840

Geliş Tarihi/Received: 10.07.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 17.11.2024



0000-0001-5639-9987, auakar@ktun.edu.tr (Akar A.U.)
0000-0001-8980-2074, cinal@ktun.edu.tr (İnal C.)

1. Giriş

Troposferik gecikme, atmosferin alt tabakasını oluşturan troposferdeki elektromanyetik dalgaların hızının azalması sonucu radyo sinyallerini doğrudan etkileyen bir faktördür (Bevis vd., 1992). Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) ve haberleşme teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan bu sinyaller, troposferde yol alırken çeşitli hava partikülleriyle etkileşime girerek alıcıya ulaşma sürelerinde değişiklikler yaşarlar (Yuan vd., 2024). Troposferin yapısına bağlı olarak partiküller kendi içerisinde ayrışır ve troposferik gecikmeye hidrostatik/kuru (hydrostatic/dry) ve ıslak (wet) bileşen olarak etki eder. Atmosferik gazların yoğun olduğu ve nispeten yeryüzüne daha uzakta olan hidrostatik bileşen, gecikme etkisinin yaklaşık %90'ını oluştururken; ıslak bileşen yaklaşık %10'unu kapsar ve konveksiyon, yağış, türbülans gibi hava olaylarının karmaşık etkileşimine göre değişkenlik gösteren su buharından oluşur (Shrestha, 2003). Islak bileşen özellikle yeryüzüne daha yakın bölgede olduğu için meteorolojik aktiviteler tarafından karakterize edilmektedir. Bu yönüyle troposfer katmanının bölgeden bölgeye, yüksekliğe, hava değişimine ve meteorolojik koşullara göre farklılaşmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan, uzaydaki her bir uydunun farklı konumlarda yer aldığı düşünüldüğünde uydu sinyallerinin yeryüzündeki herhangi bir alıcıya farklı eğim açıları ve yönlerde geldiği bilinmektedir (Zhang & Lachapelle, 2001). Bu şekilde sinyal yolunda oluşan troposferik gecikme, standart bir ölçüm için çeşitli izdüşüm fonksiyonları kullanılarak zenit yönünde belirlenir ve Toplam Zenit Gecikmesi (Zenith Total Delay, ZTD) olarak nitelendirilir (Tuka & El-Mowafy, 2013).

Troposfere bağlı doğruluğun artırılabilmesi için GNSS istasyonunun bulunduğu konumdaki gözlem anına ait meteorolojik parametrelerin var oluşu (Black & Eisner, 1984) veya uygun troposferik gecikme modelinin kullanılması önem arz etmektedir. Modelleme açısından değerlendirildiğinde ise, gecikmeye etki eden sıcaklık, basınç ve su buharının fonksiyonu şeklinde belirlenmiş kırılım katsayılarının düşey profil boyunca tanımlanması gerekir (Dogan vd., 2024). Çözüm olarak, GNSS istasyonlarına meteorolojik sensörler yerleştirilip anlık gözlemlenen verilerden troposferik gecikmenin hesaplanması ve hesap sonuçlarının GNSS sinyallerine düzeltme olarak getirilmesi gerekir (Hopfield, 1969; Saastamoinen, 1972). Günümüzde, uydu jeodezisine doğru, sürekli ve güvenilir olarak konum belirleme çözümleri sağlamak amacıyla yeryüzünde yer alan bazı GNSS istasyonlarındaki nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) terminal cihazlarına meteorolojik sensörler yerleştirilmiştir (Egea-Roca vd., 2022). Bu da sensörlerle donanımlı entegre istasyonlarda troposferik gecikmenin doğrudan belirlenmesine yönelik yüksek bir talebi ortaya koymaktadır. Ancak, GNSS ve meteorolojik sensörlerin bir arada bulunduğu entegre sistemlerin sayısının yetersiz olduğu açıktır (Yang vd., 2021). Dünya çapında 500'den fazla Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) istasyonu bulunmasına rağmen bu sistemlerin bir arada olduğu referans istasyonlarının sayısı her ülke/bölge için homojen dağılımda olmayıp aynı zamanda ihtiyaçları tümüyle karşılayamamaktadır (Osah vd., 2021). Sensörlerin maliyetli oluşu ve yüksek kalitede internet altyapısı gerektirmesi, birçok ülkenin entegreli istasyon sayısını yükseltme çabasını olumsuz yönde etkilemiştir. Çeşitli çalışmalarla, özellikle, istasyonların bulunmadığı noktalardaki ya da istasyonun bulunup meteorolojik sensörlerin bulunmadığı konumlardaki troposferik gecikmenin kestirimi için alternatif yaklaşımların izlenmesi gerektiği öne sürülmüştür (Liangke vd., 2021).

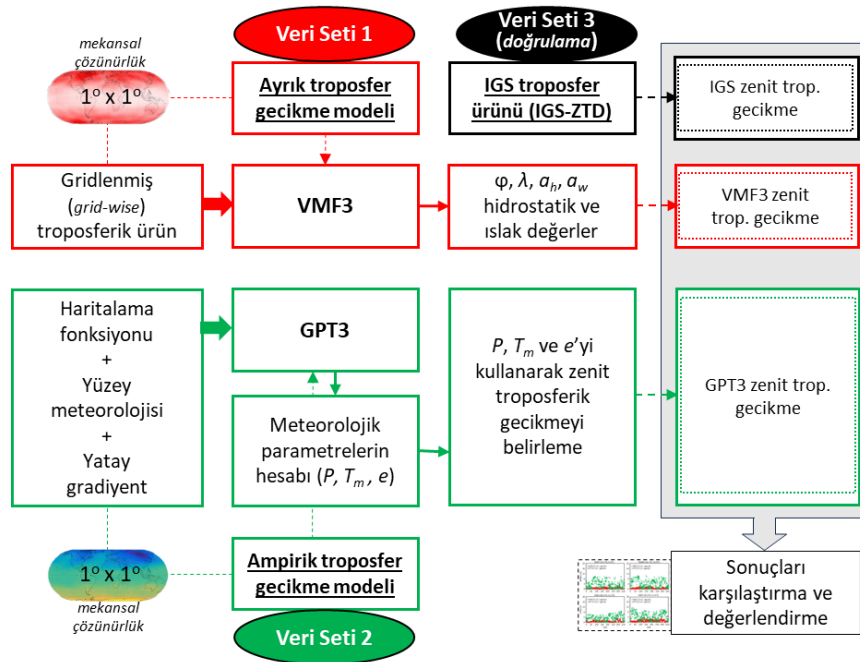
Bu sorunun çözümüne yönelik Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), yeniden analiz verilerini kullanarak Sayısal Hava Durumu Tahmini (Numerical Weather Prediction, NWP) ürünlerini geliştirmiştir. Meteorolojik veri arşivi sayesinde hava durumu tahminlerini üretmek ve troposferik gecikmeleri modellemek için global veri kaynağı sağlamıştır (Landskron & Böhm, 2018). Bahse konu ürünler yardımıyla hem ayrık hem de ampirik troposfer modellerini sağlayan Viyana İz Düşüm Fonksiyonu (Vienna Mapping Functions, VMF) Veri Sunucusu bu bakımdan ön plana çıkmaktadır. Bu sunucu, dünya çapındaki IGS istasyonları için günlük 6 saat ve 4 dönem (00:00, 06:00, 12:00 ve 18:00) zamansal çözünürlükte saha bazlı (site-wise) verileri sunarken, istasyonların

bulunmadığı rastgele konumlardaki troposferik gecikme değerlerinin kestirimi için grid bazlı (grid-wise) veriler sağlamaktadır (URL-1). Söz konusu veri sunucusunun, küresel ölçekte gridlenmiş verilerden ZTD'leri kestirebilme yeteneğine sahip olduğundan bahsedilebilir (Nzelibe & Idowu, 2023). Ancak, rastgele konumlardaki ZTD kestirimleri için kullanılan gridlenmiş ürünlerin performansının araştırılması gerekir. Grid bazlı ürünlerin saha bazlı ürünlerle karşılaştırılması, grid noktalarındaki değerlerin yerinde gözlemlere ne kadar yaklaştığının belirlenmesi açısından önemlidir (Tunalı, 2022).

Bu çalışmada, rastgele/herhangi bir konum için VMF sunucusunun sağlamış olduğu gridlenmiş Viyana İz Düşüm Fonksiyonu-3 (Vienna Mapping Function-3, VMF3; ayrıık model) ile Global Basınç ve Sıcaklık-3 (Global Pressure and Temperature-3, GPT3; ampirik model) troposfer modellerinden hangisinin kullanılması durumunda ZTD kestirimlerinin daha başarılı olacağı araştırılmıştır. Model karşılaştırmaları için ilk olarak, çalışma alanı seçimi gerçekleştirilmiş, ardından çalışmada kullanılacak olan gridli veriler temin edilmiştir (18.03.2023-18.03.2024). Söz konusu verilerden yola çıkarak bu modellerden ZTD'ler kestirilmiştir. Elde edilen ZTD'ler, IGS-ZTD troposfer ürününün referans değerleriyle karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

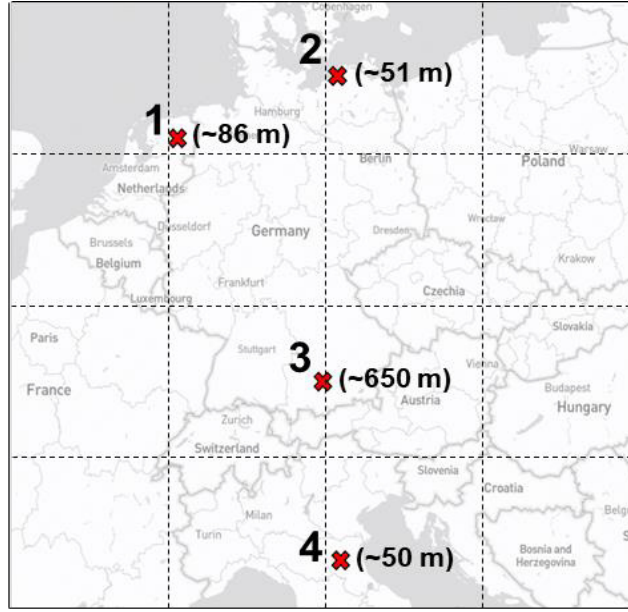
Çalışma kapsamında seçilmiş ve en son sürümler olan VMF3 ile GPT3 modellerinin ZTD kestirimindeki performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Amaca yönelik hazırlanan metodoloji Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: VMF3 ve GPT3'ün ZTD kestirimindeki performansının karşılaştırılması için oluşturulan metodoloji

Uygulamadaki süreci takiben, ilk olarak VMF3 ve GPT3 model uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi için Avrupa Bölgesi'nden dört referans noktası (bkz. Şekil 2; 1 - 4) seçilmiştir. Enlem ve yükseklik faktörünün model sonuçlarına etkisini görmek için farklı enlemlerdeki noktalar tercih edilmiştir ve bu noktalardan bir tanesi de farklı yükseklikte (3 numaralı nokta) yer almaktadır (Şekil 2). Referans noktalarının bulunduğu konumlarda gerçekte sabit GNSS istasyonları mevcuttur ve bu istasyonlardan sadece grid modellerinden kestirilen ZTD değerlerinin doğrulanması için yararlanılacaktır. Başka bir deyişle, gridlenmiş VMF3 ve GPT3'ten kestirilen ZTD değerlerinin GNSS istasyonlarındaki gözlemlenen değerlerle (IGS-ZTD

verileriyle) karşılaştırılması amaçlanmıştır.



* Parantez içerisinde yazan sayısal değerler, yüksekliği belirtmektedir.

Şekil 2: Çalışma için seçilen referans noktalarının Avrupa Bölgesi'ndeki mekânsal dağılımı

Çalışma alanı seçiminin ardından, VMF3 ve GPT3 modellerinden yararlanarak bir yıllık periyodu (18.03.2023-18.03.2024) kapsayacak şekilde veri setleri (VeriSeti1; VeriSeti2) hazırlanmıştır. VeriSeti1'de, gridlenmiş VMF3'ten elde edilen bilgiler (hidrostatik ve ıslak katsayılar vb.) yer almaktadır. VMF3 ürünü içerdiği troposferik katsayılar ve hızlı güncellenmesinden dolayı ZTD'yi yüksek doğrulukla sunabilmektedir. VeriSeti2, küresel basınç ve sıcaklık modeli olup, yılın günü ve noktanın konumuna göre üretilen ortalama meteorolojik parametrelere dayanmaktadır. Burada, GPT3 modeline bağlı kalınarak Saastamoinen Modeli ile hidrostatik bileşen belirlenmiştir. Değişken mekânsal-zamansal özelliği ve su buharı ile ilişkisinden dolayı ıslak bileşen, En Küçük Kareler Yöntemi ile bilinmeyen parametre olarak epok tabanlı kestirilmiştir. Bu yönüyle, VeriSeti2'nin içerisinde hidrostatik ve ıslak bileşenin entegrasyonu olan ZTD'ler yer almaktadır. IGS troposfer ürünü (VeriSeti3) ise yukarıda ifade edildiği gibi grid modellerin doğrulanması için kullanılmıştır. Nihai aşamada, VMF3 ve GPT3 modellerinden elde edilen ZTD değerleri, IGS troposfer ürününden (IGS-ZTD) elde edilen referans ZTD değerleriyle karşılaştırılarak model performansları değerlendirilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için her üç modelden elde edilen ZTD'ler günlük olarak hesaplanmıştır (Epok aralığı VMF3 için $6sa \gg ZTD_{günlük}$; GPT3 için $ZTD_{günlük} \gg ZTD_{günlük}$; IGS-ZTD için $5dk \gg ZTD_{günlük}$ olarak düzenlenmiştir.) Kullanılan veri setlerine ait detaylı açıklamalara sonraki bölümlerde yer verilmektedir.

2.1 Viyana İz Düşüm Fonksiyonu-3 (Vienna Mapping Functions-3, VMF3) Modeli

VMF veri sunucusu (<https://vmf.geo.tuwien.ac.at/>), küresel anlamda çok sayıda IGS istasyonu için açık erişimli veri sunmaktadır. Ayrık troposfer gecikme modellerinin öncüsü olan bu sunucu hem grid hem de istasyon bazlı ışın izlemeli (ray-tracing) VMF1 ve VMF3 troposferik ürünlerini kullanıcılara sağlamaktadır (Akar & İnal, 2024). İlk olarak VMF1 ürünü, ECMWF ERA-40 yeniden analiz verileri kullanılarak 3° yükseklik açısında ışın izlemeli gecikmelere dayalı olarak oluşturulmuştur (Böhm vd., 2006). Bir diğer VMF3 ürünü ise, VMF1'in geliştirilmiş ve yükseklik açısındaki eksiklikleri giderilmiş versiyonudur. Bu troposferik ürün, sayısal hava tahmin modellerine dayalı 3° yükseklik açısında ve sekiz eşit aralıklı azimutta ışın izlemeli izdüşüm fonksiyonlarına göre üretilmiştir (Ssenyunzi vd., 2023). İki troposfer ürünü de her altı saatte bir, dört epokta (00, 06, 12 ve 18, günlük) yayınlanmaktadır (URL-1). VMF3, $1^\circ \times 1^\circ$ ve $5^\circ \times 5^\circ$ mekânsal çözünürlüğe sahip olup küresel gridler şeklinde de belirlenebilmektedir (Nzelibe & Idowu, 2023). Grid verileri içerisinde; enlem, boylam,

zenit hidrostatik ve ıslak bileşenlerin izdüşüm fonksiyonu katsayıları, zenit hidrostatik gecikme, zenit ıslak gecikme bileşenleri paylaşılmaktadır (https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GNSS/VMF3/). Altı saatlik epok aralığına sahip olan bu veriler çalışma kapsamında ortalaması alınarak günlük olarak belirlenmiştir.

2.2 Global Basınç ve Sıcaklık - 3 (Global Pressure and Temperature-3, GPT3) Modeli

GPT3 modeli, [Chen ve Herring \(1997\)](#) tarafından gradyan formülü için tasarlanmış, ampirik yatay gradyanları da içeren GPT2w'nin devamıdır ve GPT serisinin en yeni versiyonudur ([Landskron & Böhm, 2018](#)). Bu ampirik model, atmosferik parametreler arasında basınç, ağırlıklı ortalama sıcaklık, su buharı basıncı ve su buharı sıcaklık düşüş oranı gibi önemli faktörler esas alınarak geliştirilmiştir ([Yuan vd., 2024](#)). Model aynı zamanda, kullanıcılar için ortalama değer ve grid noktalarındaki genlik ile küresel meteorolojik parametreleri türeterek $1^\circ \times 1^\circ$ ve $5^\circ \times 5^\circ$ mekânsal çözünürlükte troposfer ürünü oluşturabilmektedir ([Li vd., 2022](#); URL-1). Söz konusu GPT3 modeline ilişkin trigonometrik eşitlik aşağıda verilmiştir (1).

$$m(t) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 4\pi\right) \quad (1)$$

Burada, $m(t)$ kestirilecek meteorolojik parametreyi, A_0 ortalama değeri, (A_1, B_1) yıllık genlikleri, (A_2, B_2) altı aylık genlikleri, doy yılın gününü temsil etmektedir. Eşitlik 1'e dayalı olarak en yakın dört grid noktasından gerekli meteorolojik parametrelerin elde edilmesinde, istenilen konumun parametrelerinin kestirimi için çift doğrusal enterpolasyon algoritması kullanılmaktadır ([Wei vd., 2023](#)). Buraya kadar olan kısım modelden meteorolojik parametrelerin elde edilmesini kapsamaktayken, elde edilen sonuçlar [Saastamoinen \(1972\)](#) ve [Askne ve Nordius \(1987\)](#) gibi troposferik gecikme modellerine dahil edilmektedir. Literatürde, hidrostatik ve ıslak bileşenlerin kestirimi için GPT3 modeline ilişkin farklı araştırmalar mevcuttur ([Bahadur, 2022](#); [Landskron & Böhm, 2018](#)).

2.3 IGS Troposfer (IGS-ZTD) Ürünü

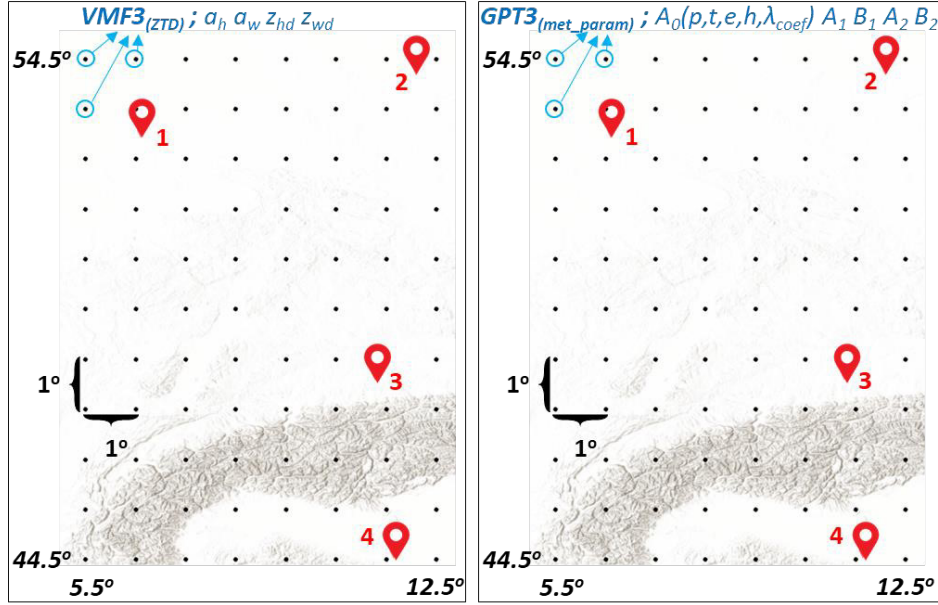
IGS analiz merkezi, yer tabanlı GNSS gözlemlerine dayalı olarak elde edilen troposferik gecikme düzeltme ürünlerini sunmaktadır ([Teunissen & Montenbruck, 2017](#)). Troposferik ürünlerdeki veri dosyaları; ZTD, kuzey ve doğu troposfer gradyan bileşenlerinin beş dakikalık tahminlerini içerir. Veriler, IGS ağında yaklaşık 513 GNSS istasyonu için saha bazında günlük dosyalar halinde mevcuttur (URL-2). IGS tarafından paylaşılan troposfer ürünlerinde; IGS final uydu yörünge ve yer dönme parametresi ürünleri kullanılır ve bu nedenle gözlem gününden yaklaşık üç hafta sonra kullanıma hazır hale gelirler. Model hesaplamalarında, öncül troposfer (hidrostatik) değerleri için Saastamoinen Modeli ve Niell İzidüşüm Fonksiyonu (Niell Mapping Function, NMF), ıslak bileşen kısmını kestirmek için de Islak Global İzidüşüm Fonksiyonu (Wet Global Mapping Function, wet GMF) kullanılmaktadır. Troposferik ürünler, standart IGS formatında mevcuttur (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere>) ve 4 mm'ye kadar doğrudur. Böylece diğer ZTD ürünlerinin performanslarını değerlendirmek için referans standardı olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada, IGS tarafından yayınlanan troposferik ürün (IGS-ZTD), gridlenmiş VMF3 ve GPT3 modelleri tarafından elde edilen günlük ZTD değerlerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Diğer bir ifadeyle, uluslararası anlamda geçerliliği olan, doğruluğu yüksek ve bilimsel araştırmalarda sıklıkla kullanılan IGS-ZTD ürününe nispeten yakın sonuç elde edilebilen gridlenmiş ürünün belirlenmesi hedeflenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

VMF3 modelinden elde edilen ZTD'ler ile GPT3 modeline dayalı türetilen ZTD değerlerine ilişkin analiz sonuçları bu bölümde tartışılacaktır. Değerlendirmeye geçmeden önce, önceki bölümlerde bahsedildiği gibi Avrupa Bölgesi'nden seçilmiş

dört referans noktasını kapsayacak şekilde troposferik ürünlerden (VMF3 ve GPT3) $1^\circ \times 1^\circ$ mekânsal çözünürlükte ilgili veriler alınmıştır. VMF3 için sıcaklık, basınç, su buharı basıncı ve hidrostatik/ıslak bileşen katsayılarına dayalı olarak günlük ZTD'ler elde edilmiş (Şekil 3a'daki siyah noktalardan oluşan gridler) ve bu ZTD'lerden bilineer enterpolasyon yoluyla da dört noktadaki sonuç değerler kestirilmiştir. Diğer taraftan, GPT3'te ilk belirlenmesi gereken meteorolojik değerler olduğu için grid noktalarında sıcaklık, basınç, su buharı basıncı gibi parametre değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3b). Söz konusu parametrelerin Saastamoinen Modeli'ne dahil edilmesiyle hidrostatik bileşenler, bilinmeyen parametrelerin epok bazlı kestirimiyle de ıslak bileşenler tespit edilerek bunun sonucunda ZTD'ler elde edilmiştir. Yine VMF3 modelinde olduğu gibi, bilineer enterpolasyon yoluyla dört referans noktasının ZTD'leri kestirilmiştir.

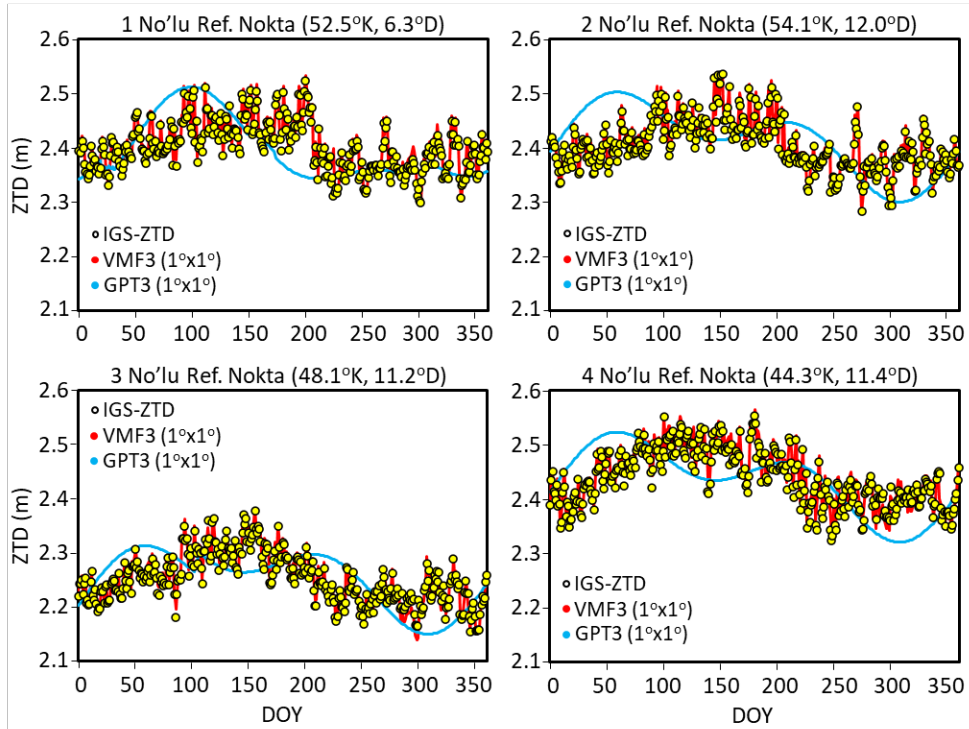


Şekil 3: (a) VMF3 ve (b) GPT3 verilerinin bilineer enterpolasyonu yoluyla dört referans noktasındaki ZTD'lerin kestirimi

Şekil 4, ilgili referans noktalarında VMF3/GPT3 ürünlerinden elde edilen günlük ZTD'ler ile IGS'nin sağladığı ZTD'lerin zaman serilerini göstermektedir. Görüldüğü üzere farklı konumlardaki referans noktalarının tümünde meteorolojik koşullara bağlı olarak mevsimsel etkinin var olduğu ve bu etkinin uzun periyotta dalgalanmalara yol açtığı söylenebilir. Zaman serilerine bakıldığında VMF3 modelinin IGS-ZTD'ye daha yakın sonuçlar ürettiği, GPT3 modelinin ise biraz daha farklı sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. Özellikle, yazdan kışa ya da kıştan yaza geçiş gibi mevsimsel değişimlerin yaşandığı belirli dönemlerde GPT3 modelinin VMF3'e kıyasla daha belirgin sonuçlar ürettiği görülebilir (Şekil 4'teki zaman serilerinde oluşan yeşil renkli tepe ve çukurlar). Bunun sebebi GPT3 modelinin mevsim geçişlerindeki kırılmaları tam olarak yansıtamayıp hesaplamalar sonucunda bunu sinüzoidal dalgalanma şeklinde belirleyebilmesidir. GPT3 modeli yalnızca ZTD yıllık ve altı aylık döngü özelliklerini içeren ampirik bir modeldir. Dolayısıyla GPT3 modelinin performansı farklı dönemlerde benzerdir (Cao vd., 2021). Ancak bu durum modelin arazi koşullarındaki atmosferik şartlara bağlı sonuç üretmesi açısından dezavantajdır. Çünkü ortalama değerlere dayalı olarak deneysel eşitlikler sonucu elde edilen ZTD'ler, anlık arazi şartlarından ve ilgili konumdaki gözlemlenen ZTD'lerden farklılaşabilmektedir (Li vd., 2022).

Şekil 4'teki serilerden; 1,2 ve 4 no'lu referans noktalarının ZTD açısından benzer karakteristik değerleri sergilediği ve bu değerlerin yıllık ortalama 2.4 m olduğu sonucuna varılmıştır. 3 no'lu referans noktası ise daha düşük ZTD değerlerine sahiptir ve yıllık ortalama ZTD 2.2 m olarak bulunmuştur. Bu noktanın diğer üç noktaya kıyasla yüksekliğinin fazla olması hava yoğunluğunun daha az ve atmosferin ince oluşu, sıcaklığın tutunamamasına sebep olmuştur. ZTD değeri, atmosferik katman kalınlığı, sıcaklık değişimleri ve arazi özelliklerinden dolayı yükseklikten etkilenir. Yükseklik arttıkça atmosfer kalınlığı ve

su buharı içeriği genellikle azalır. Bu faktörler tipik olarak yüksek rakımlarda daha düşük ZTD değerlerine yol açarak modellerin doğruluğunu etkiler (Akar & Inal, 2024 ;Yao vd., 2018).



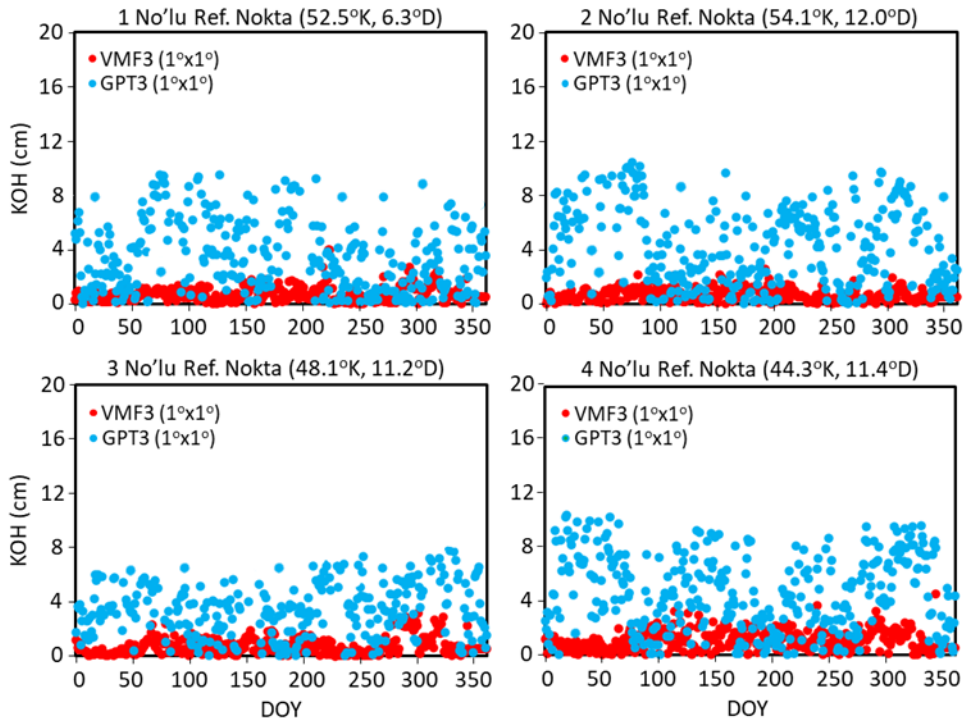
Şekil 4: Farklı troposferik ürünlerden elde edilen ZTD zaman serileri

Troposfer ürünlerinin ZTD'yi kestirme yeteneğini daha detaylı araştırmak için, VMF3 ve GPT3'ten kestirilmiş günlük ZTD'ler ile yerinde gözlemlerle elde edilmiş referans IGS-ZTD verileri arasındaki farkların Karesel Ortalama Hataları (KOH) ve maksimum değerleri hesaplanmıştır (Tablo 1). Ayrıca, ilgili ürünlerin performanslarını zamansal yönüyle göstermek için Şekil 5'teki dağılım grafikleri oluşturulmuştur.

Tablo 1'de, VMF3 modeli GPT3 modelinden daha düşük KOH değerlerine sahiptir. Burada, GPT3 modelinden elde edilen KOH değerleri 3.2-5.0 cm arasında değişirken, VMF3 modelinde 0.7-1.1 cm arasında değişim gözlemlenmiştir. Özellikle, 3 no'lu referans noktasının diğer üç noktadan daha yüksek rakımda bulunmasına rağmen model doğruluğu azalmamıştır. Çünkü, bu çalışmada kullanılan VMF3 ve GPT3 modellerinde yükseklik düzeltmeleri halihazırda dikkate alındığı için sonuçları etkilememiştir. Diğer taraftan, Şekil 5'e bakıldığında özellikle GPT3 modeli KOH'larının daha dağınık bir yapıda olduğu görülebilir. KOH'ların dağınık yapısı ve yatay eksenle uzaklaşması, GPT3 modelinin ZTD'yi daha düşük doğrulukla tahmin ettiğini göstermektedir.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan modeller ile referans IGS-ZTD arasındaki farklardan elde edilen KOH ve maksimum değerler

Referans No.	VMF3		GPT3	
	KOH (cm)	Mak. Değer (cm)	KOH (cm)	Mak. Değer (cm)
1	0.8	3.8	3.5	9.5
2	1.0	3.0	4.0	10.0
3	0.7	3.7	3.2	8.1
4	1.1	5.9	5.0	11.3



Şekil 5: DOY'lara göre VMF3 ve GPT3 modellerinden elde edilen KOH değerleri

Genel anlamda, VMF3 modelinden elde edilen bulgular herhangi bir bölgedeki toplam zenit gecikmelerinin çift doğrusal enterpolasyon yaklaşımıyla kestirimi çalışmalarında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Aynı zamanda, troposfer model doğruluğu için düşey profil boyunca bilgiye ihtiyaç olduğu dikkate alınırsa ampirik modelin (GPT3) ışın izlemeli modele (VMF3) kıyasla daha düşük doğrulukta sonuç üretmesi olasıdır. Referans IGS-ZTD değerleri, GNSS veri değerlendirmeleri sonucunda elde edilmektedir ve bu değerlendirmede atmosferin doğrudan algılanması sağlanmaktadır. VMF3 değerleri de içerdiği katsayılar ve yerinde ölçüler (in-situ) ile kısa periyotta güncellenerek gecikmeyi başarılı bir şekilde belirleyebilmektedir. Bu, Tablo 1'deki VMF3-ZTD ile IGS-ZTD arasındaki KOH'ların daha düşük olmasının bir diğer nedenidir. Günümüzde, her iki troposfer modeli de yaygın olarak kullanılmasına rağmen dokuzuncu dereceye kadar küresel harmoniklere dayanan GPT3 modeli, yerinden gözlemlerden/değerlerden uzaklaşmaktadır (Chen vd., 2011). Diğer bir ifadeyle, bu çalışmanın sonuçlarından, VMF3'ün GPT3 modeline kıyasla saha bazındaki (site-wise) troposfer modellere daha yakın sonuçlar elde ettiği sonucuna varılabilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, VMF Veri Sunucusu'nun ayırık (grid bazlı VMF3) ve ampirik (GPT3) modellerine dayalı olarak kestirilen günlük ZTD'ler değerlendirilmiştir. Modellerin performansını karşılaştırmak için IGS tarafından sağlanan ZTD ürünleri (IGS-ZTD) referans değerler olarak kullanılmıştır. 2023'ten 2024'e kadar bir yıllık zamansal alanı kapsayan, Avrupa Bölgesi'nden seçilmiş rastgele dört referans noktası için ZTD'ler kestirilmiş ve KOH değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, VMF3 modelinin IGS-ZTD referans değerlerine benzer sonuçlar ürettiğini (Şekil 4) ve bu gridlenmiş modelin GPT3 modeline kıyasla daha iyi doğruluk performansı sergilediğini göstermiştir (Tablo 1). ZTD farklarından elde edilen bulgular dikkate alındığında, GPT3 modelinin rastgele seçilmiş dört referans noktasındaki KOH değerleri 3.2 cm ile 5.0 cm arasında değişirken, bu değerler VMF3 modelinde 0.7 cm ile 1.1 cm arasında değişmiştir. Yani, GPT3 modelindeki hata değerleri, VMF3 modeline kıyasla neredeyse beş katı büyüklüktedir.

Çalışmada yükseklik farkının da sonuçlara etkisini görmek amacıyla 3 no'lu referans noktası, diğer 1, 2 ve 4 no'lu noktalara

kiyasla daha yüksek rakımda seçilmişti. Her ne kadar yükseklik farkı troposfer ürünlerinin doğruluğunu etkileyen en önemli kriterlerden biri olsa da ayırık ve ampirik modeller halihazırda yükseklik düzeltmesini dikkate aldığı için sonuçlarda önemli ölçüde değişikliklere yol açmamıştır. Yüksekliğin artması sonucu atmosfer sıcaklığının, katman kalınlığının ve su buharı içeriğinin azalışından dolayı, Şekil 4'teki zaman serilerinden de görüldüğü gibi sadece ZTD değerlerinin daha düşük olmasına etki etmiştir.

Sonuç olarak; ayırık VMF3 modelinin, ampirik GPT3 modeline göre enterpolasyonu daha doğru uygulama ve iyi mekânsal genelleme kabiliyetlerine sahip olduğu görülebilir. Bu yönüyle VMF3'ün tahmin başarısı, GPT3 modelinden daha yüksektir. Özellikle, yerinde gözlemin mümkün olmadığı ya da saha bazlı ürünlere ait veri arşivinin olmadığı/eksik olduğu konumlarda modellerin her ikisi de tercihe bağlı kullanılabilir. Dezavantajı şudur ki, bölgesel varyasyonları ve mevsimsel etkileri yerinde gözlemlendiği gibi net bir şekilde ortaya çıkaramazlar ve hatalara sebebiyet verebilirler.

Teşekkür

Bu çalışma, ilk yazarın Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanan doktora tezinin bir parçasıdır.

Yazar Katkısı

Ali Utku Akar: Fikir, Literatür taraması, Veri toplama, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Cevat İnal:** Denetleme, Makale değerlendirme, Yazım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Akar, A. U., & Inal, C. (2024). Performance of spatial interpolation methods in predicting GNSS zenith total delay. *Measurement*, 227, 114189.
- Askne, J., & Nordius, H. (1987). Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio science*, 22(03), 379-386.
- Bahadur, B. (2022). Farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansına etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 756-768.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787-15801.
- Black, H. D., & Eisner, A. (1984). Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D2), 2616-2626.
- Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B2).
- Cao, L., Zhang, B., Li, J., Yao, Y., Liu, L., Ran, Q., & Xiong, Z. (2021). A regional model for predicting tropospheric delay and weighted mean temperature in China based on GRAPES_MESO forecasting products. *Remote Sensing*, 13(13), 2644.
- Chen, G., & Herring, T. (1997). Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20489-20502.

- Chen, Q., Song, S., Heise, S., Liou, Y. A., Zhu, W., & Zhao, J. (2011). Assessment of ZTD derived from ECMWF/NCEP data with GPS ZTD over China. *GPS solutions*, 15, 415-425.
- Dogan, A. H., Zus, F., Dick, G., Wickert, J., Schuh, H., Durdag, U. M., & Erdogan, B. (2024). Improving the wet mapping function by numerical weather models. *Advances in Space Research*, 73(1), 404-413.
- Egea-Roca, D., Arizabaleta-Diez, M., Pany, T., Antreich, F., Lopez-Salcedo, J. A., Paonni, M., & Seco-Granados, G. (2022). GNSS user technology: State-of-the-art and future trends. *IEEE Access*, 10, 39939-39968.
- Hopfield, H. S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical research*, 74(18), 4487-4499.
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of geodesy*, 92, 349-360.
- Li, S., Xu, T., Xu, Y., Jiang, N., & Bastos, L. (2022). Forecasting gnss zenith troposphere delay by improving gpt3 model with machine learning in antarctica. *Atmosphere*, 13(1), 78.
- Liangke, H., Ge, Z., Hua, P., Hua, C., Lilong, L., & Weiping, J. (2021). A global grid model for the vertical correction of zenith wet delay based on the sliding window algorithm. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(5), 685.
- Nzelibe, I. U., & Idowu, T. O. (2023). Refinement of global gridded ray-traced Zenith tropospheric delay over Nigeria based on local GNSS network observations. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(1), 100137.
- Osah, S., Acheampong, A. A., Fosu, C., & Dadzie, I. (2021). Deep learning model for predicting daily IGS zenith tropospheric delays in West Africa using TensorFlow and Keras. *Advances in Space Research*, 68(3), 1243-1262.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 105(1), 279-298.
- Shrestha, S. M. (2003). *Investigations into the estimation of tropospheric delay and wet refractivity using GPS measurements* (Doktora Tezi). Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Kanada.
- Ssenyunzi, R. C., Andima, G., Amabayo, E. B., & Realini, E. (2023). Performance of ray-traced VMF3 products in retrieving Zenith Tropospheric Delay over the African tropical region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 243, 106014.
- Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Tuka, A., & El-Mowafy, A. (2013). Performance evaluation of different troposphere delay models and mapping functions. *Measurement*, 46(2), 928-937.
- Tunalı, E. (2022). Water vapor monitoring with IGS RTS and GPT3/VMF3 functions over Turkey. *Advances in Space Research*, 69(6), 2376-2390.
- Wei, M., Yu, X., Ke, F., He, X., & Xu, K. (2023). A Refined Zenith Tropospheric Delay Model Based on a Generalized Regression Neural Network and the GPT3 Model in Europe. *Atmosphere*, 14(12), 1727.
- Yang, F., Guo, J., Li, J., Zhang, C., & Chen, M. (2021). Assessment of the troposphere products derived from VMF data server with ERA5 and IGS data over China. *Earth and Space Science*, 8(8), e2021EA001815.
- Yao, Y., Xu, X., Xu, C., Peng, W., & Wan, Y. (2018). GGOS tropospheric delay forecast product performance evaluation and its application in real-time PPP. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 175, 1-17.
- Yuan, D., Li, J., Yao, Y., Yang, F., Wang, Y., Chen, R., & Xu, T. (2024). Assessment of the three representative empirical models for zenith tropospheric delay (ZTD) using the CMONOC data. *Geodesy and Geodynamics*.
- Zhang, J., & Lachapelle, G. (2001). Precise estimation of residual tropospheric delays using a regional GPS network for real-time kinematic applications. *Journal of Geodesy*, 75, 255-266.
- URL-1: VMF Data Server, <http://doi.org/10.17616/R3RD2H> (Erişim Tarihi: 18 Şubat 2024).
- URL-2: International GNSS Service (IGS), <https://igs.org/products/> (Erişim Tarihi: 6 Nisan 2024).

Performance assessment of interpolation techniques for investigation Covid-19 spread in Türkiye

Duygu Arıcan^{1*} , Nursu Tunalioglu¹ 

¹Yıldız Technical University, Campus of Davutpaşa, Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatic Engineering, Esenler, Istanbul, Türkiye.

Abstract: Throughout history, viruses have posed significant threats to human life and health. In the context of the historical pandemics, Covid-19, rapidly spread across continents and was declared a pandemic by the World Health Organization on 11 March 2020. The first case in Türkiye was detected on the same date. Understanding the spatial distribution of the Covid-19 is crucial for effective public health planning and intervention. Geographic Information Systems (GIS) technology can be leveraged as a visualization aid to map the geographical distribution of the disease, the potential risk factors, and the resources available for treatment and prevention. To effectively map and analyze the spatial distributions, and local/global dynamics of the Covid-19 virus, various GIS-based interpolation methods were employed. To understand these dynamics, this study presents a detailed spatial analysis using interpolation methods to evaluate spatiotemporal changes on seasonal levels in the Covid-19 pandemic in Türkiye. Seasons investigated in a 1-year period were determined as follows: Spring, from 20 March 2021 to 18 June 2021; Summer, from 19 June 2021 to 17 September 2021; Autumn, from 18 September 2021 to 17 December 2021; and Winter, 18 December 2021 to 18 March 2022. Seasonal case distribution maps produced from city-level and district-level seasonal case data utilizing Inverse Distance Weighting (IDW), Radial Basis Function, Spline interpolation, and Empirical Bayesian Kriging (EBK) interpolation methods. Finally, the spread of Covid-19 in Türkiye was investigated on the seasonal scale, and interpolation results were assessed by standard deviation, mean absolute error, and root mean square error. The results of this study demonstrated that the period of highest incidence of cases of Covid-19 in Türkiye was winter. Overall, when considering error metrics, EBK and IDW generally proved to be the most reliable methods across different scales and conditions. In contrast, Spline interpolation's tendency to overfit the data made it less suitable for these datasets.

Keywords: Covid, Pandemic, Data visualization, Spatial interpolation, Performance assessment

Türkiye'de Covid-19 yayılımının araştırılmasında enterpolasyon tekniklerinin performans değerlendirmesi

Öz: Virüsler, tarih boyunca insan yaşamı ve sağlığı için önemli tehditler oluşturmuştur. Tarihsel pandemiler bağlamında Covid-19, kıtalar arasında hızla yayılmış ve 11 Mart 2020 tarihinde Dünya Sağlık Örgütü tarafından pandemi olarak ilan edilmiştir. Türkiye'deki ilk vaka da aynı tarihte tespit edilmiştir. Covid-19'un mekânsal dağılımının anlaşılması, etkili halk sağlığı planlaması ve müdahalesi için çok önemlidir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi, hastalığın coğrafi dağılımını, potansiyel risk faktörlerini tedavi ve önleme için mevcut kaynakların haritalanması için bir görselleştirme aracı olarak kullanılabilir. Covid-19 virüsünün mekânsal dağılımlarının ve yerel/küresel dinamiklerinin etkin bir şekilde haritalanması ve analiz edilmesi için çeşitli CBS tabanlı enterpolasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu dinamiklerin anlaşılabilmesi için bu çalışma, Türkiye'deki Covid-19 pandemisindeki mekânsal-zamansal değişikliklerinin değerlendirilmesi üzerine enterpolasyon yöntemlerini kullanarak mevsimsel düzeyde ayrıntılı bir mekânsal analiz sunmaktadır. Bir yıllık dönemde incelenen mevsimler: İlkbahar, 20 Mart 2021 - 18 Haziran 2021 tarihleri arası; Yaz, 19 Haziran 2021 - 17 Eylül 2021 tarihleri arası; Sonbahar, 18 Eylül 2021 - 17 Aralık 2021 arası; ve Kış, 18 Aralık 2021 - 18 Mart 2022 tarihleri arası olarak belirlenmiştir. Mevsimsel dağılım haritaları, Ters Mesafe Ağırlıklandırma (IDW), Radyal Temelli Fonksiyon, Spline enterpolasyonu ve Ampirik Bayesian Kriging (EBK) enterpolasyon yöntemleri kullanılarak şehir ve ilçe düzeyinde mevsimsel vaka verilerinden üretilmiştir. Son olarak, Covid-19'un Türkiye'deki yayılımı mevsimsel ölçekte incelenmiş ve enterpolasyon sonuçları standart sapma, ortalama mutlak hata ve kök ortalama kare hatası ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, Türkiye'de Covid-19 vakalarının en sık görüldüğü dönemin kış mevsimi olduğunu göstermiştir. Genel olarak, hata ölçütleri dikkate alındığında, EBK ve IDW'nin farklı ölçekler ve koşullar arasında en güvenilir yöntemler olduğu kanıtlanmıştır. Buna karşılık, Spline'in verilere aşırı uyum sağlama eğilimi, onu bu veri kümeleri için daha az uygun hale getirmiştir.

Anahtar Sözcükler: Covid, Pandemi, Veri görselleştirme, Mekânsal enterpolasyon, Performans değerlendirme

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 212 383 5298

Geliş Tarihi/Received: 03.09.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 18.11.2024



0000-0002-4618-4357, duyguaricann@gmail.com (Arıcan D.)*
0000-0001-9345-5220, ntunali@yildiz.edu.tr (Tunalioglu N.)

1. Introduction

Throughout history, viruses have posed significant threats to human life and health. From the Spanish Flu of 1918 to the more recent H1N1 pandemic, viral outbreaks have repeatedly demonstrated their potential for widespread morbidity and mortality (Johnson & Mueller, 2002; Taubenberger & Morens, 2006). The global incidence of outbreaks, defined as both pandemics and epidemics, has been considerable throughout history. While epidemics affect a substantial proportion of individuals within a given society, pandemics, in contrast to epidemics, have a significant impact on economic and social order across a wider geographical area (Jedwab et al., 2021).

In the context of historical pandemics, the current SARS-CoV-2 (Covid-19) virus-induced pandemic represents a modern-day crisis with an unforeseen global impact. In late December 2019, the initial cases of the novel coronavirus were identified in Wuhan, China, presenting with atypical pneumonia (Zhu et al., 2020). The initial situation report prepared by the World Health Organization (WHO) indicated that, as of the 20th of January 2020, there had been a total of 282 confirmed cases of the disease. Of these, 278 were in China, 2 were in Thailand, 1 was in Japan and 1 was in Korea. Subsequently, the virus spread rapidly across Asia, Europe, America and Africa, leading to its declaration as a pandemic by the WHO on 11 March 2020. On the same date, the first case of Covid-19 was detected in Türkiye and subsequently announced by the Minister of Health, Fahrettin Koca (URL-1). On 5 May 2023, the WHO announced that the status of the Covid-19 pandemic had been revised from a public health emergency of international importance to a pandemic due to the ongoing infectiousness and disease (URL-2). The rapid spread and high transmissibility of Covid-19 have underscored the critical need for effective public health strategies and interventions.

The trajectory of the pandemic in Türkiye mirrored global trends, with waves of infections prompting a series of public health interventions, including lockdowns, travel restrictions, and vaccination campaigns (URL-3). The impact on Türkiye's healthcare system and economy has been profound, highlighting the importance of understanding the spatial and temporal dynamics of the virus.

Understanding the spatial distribution of the virus is crucial for effective public health planning and intervention. At this point, Geographic Information System (GIS) has proven invaluable in mapping and analyzing the spatial spread of infectious diseases, offering insights that are critical for targeted responses. For instance, GIS technology can be leveraged as a visualization aid to map the geographical distribution of the disease, the potential risk factors, and the resources available for treatment and prevention (Jia et al., 2023; Kang et al., 2020; Kumar et al., 2020; Murugesan et al., 2020).

A variety of GIS applications, including interpolation methods, have been employed to enhance comprehension of the spatial distribution and local and global dynamics of the Covid-19 disease (Franch-Pardo et al., 2020). Ibarra-Bonilla et al. (2023) used the Inverse Distance Weighting (IDW) method to analyze the spatial distribution Covid-19 cases and deaths in the state of Chihuahua, Mexico, from Winter 2019-2020 to Fall 2021. The study emphasized the significance of human mobility and socio-economic elements in the propagation of the disease and concluded that the IDW method was a valuable tool for elucidating the spatial dissemination of the virus and could potentially contribute to its management. Murugesan et al. (2020), employed the use of IDW interpolation to predict the spread of the novel coronavirus (Covid-19) in India. This approach allowed for the identification of high-risk areas, providing valuable information for government monitoring and response strategies. The study's findings suggest that IDW interpolation is an effective method for predicting the spread of the disease in India. Furthermore, the study proposes that this method can be applied to other countries with similar distance and density characteristics. Cong Nhut (2023) compares the Kriging methodology with traditional techniques for predicting the number

of deaths resulting from Covid-19 in Vietnam. The findings demonstrate that the Kriging approach results in a smaller forecast error and is therefore a suitable method for developing a predictive model.

Despite the extensive literature on Covid-19, there is a notable absence of studies focusing on the geographic distribution of cases, particularly in Türkiye. Some studies have focused on the relationship between vehicle traffic and air quality during the pandemic in Türkiye (Alemdar et al., 2021; Bugdayci et al., 2023; Kotan & Erener, 2023). Kurlangıçoğlu (2022) investigated the impact of regional characteristics on the spatial distribution of the pandemic in Türkiye. The study employed the use of IDW interpolation and multiple linear regression analysis to examine the relationship between provincial incidence rates and 18 explanatory variables.

Although there are studies in the literature comparing interpolation methods (Ikechukwu et al., 2017; Li & Heap, 2008), there is a gap in the existing literature regarding the investigation of the performance of interpolation methods utilizing data regarding Covid-19. This is particularly regarding the visualization of the spatial distribution of the virus, which has not been adequately addressed in previous studies. This study aims to evaluate the performance of the selected interpolation methods regarding the spatial distribution of Covid-19 in Türkiye. For this purpose, the city-level data on the number of cases of Covid-19 in Türkiye was employed to derive interpolated maps. To assess the impact of the pandemic, the data were arranged on a seasonal timescale, and a district-level dataset was produced by weighting the population of each district. Both city-level and district-level data were randomly divided as 90% for interpolation models and 10% for the accuracy assessment of the interpolation. Interpolated maps produced from city-level and district-level seasonal case data utilizing IDW, Radial Basis Function (RBF), Spline interpolation, and Empirical Bayesian Kriging (EBK) interpolation methods. Finally, the spread of Covid-19 in Türkiye was investigated on the seasonal scale, and interpolation results were assessed by standard deviation (SD), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE).

2. Methodology

The analyses in this study are implemented as follows: first, the data sets were collected and organized, statistical quantities were calculated, and interpolation methods were applied to the data sets. Finally, accuracy was assessed by statistical results, and the spread of the pandemic was evaluated.

2.1 Study Area

This study has been realized using the seasonal coronavirus case numbers in Türkiye. The study area, Türkiye, is located at the intersection of two continents, centered on the Anatolian peninsula in Western Asia and within a minor portion of Southeast Europe. Türkiye comprises 81 cities, and 922 districts.

The data set comprised 90% of cities and districts, which were randomly selected for use in the construction of interpolated maps. The remaining 10% of cities and districts were reserved for the purpose of map control. In other words, the accuracy of the interpolated maps was assessed using 92 districts and 8 cities. Figure 1 provides a visual representation of the geographical scope of the study, illustrating the borders of cities and districts and the cities and districts utilized as a control.

2.2 Materials and Methods

The Covid-19 case number data in this study were provided by the Turcovid19 (<https://turcovid19.com>) open data platform. The Turcovid19 platform presents Türkiye's Covid-19 pandemic data in xls and csv file extensions, ready for analysis (Uçar et al., 2020). The Python programming language was used to organize and analyze the data for this investigation. The

spatiotemporal studies were performed using the ArcGIS Pro 3.3.1 software.

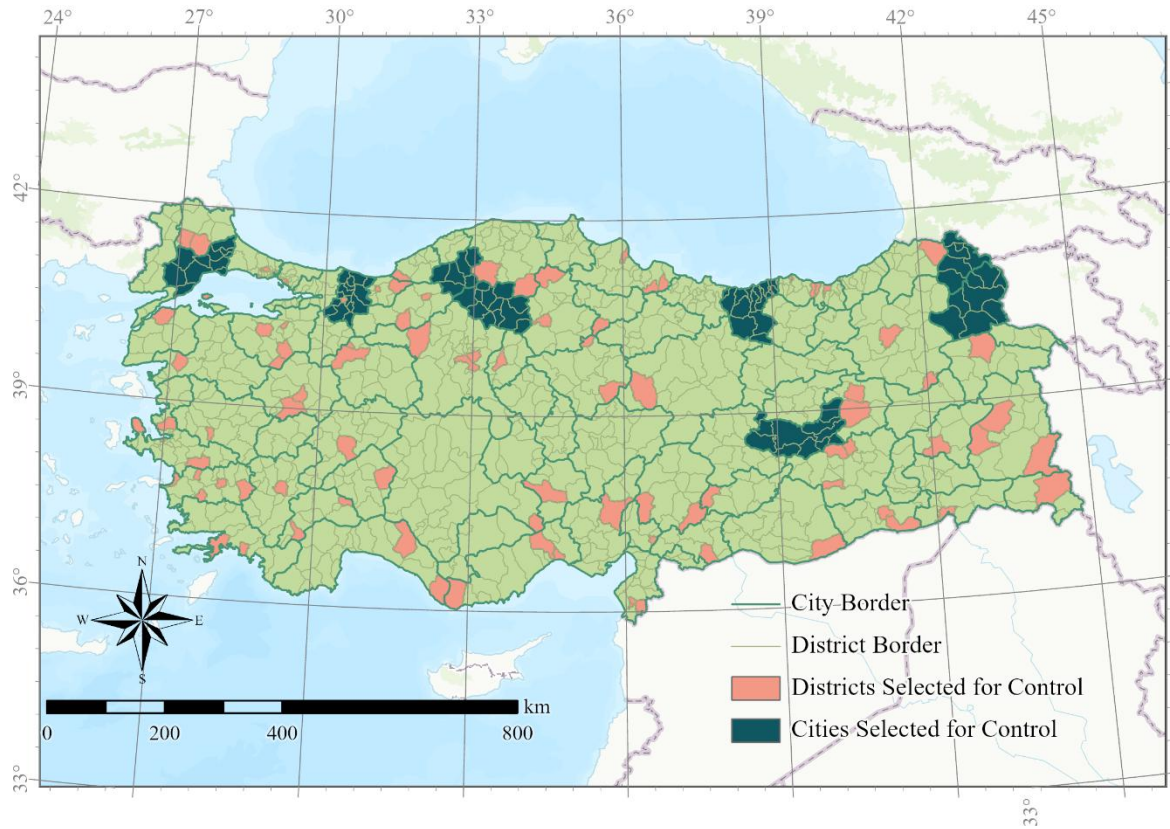


Figure 1: Map of the study area, Türkiye

Country-level data is available from the first case of Covid-19 in Türkiye, which was announced by the Turkish Ministry of Health on March 11, 2020, to May 31, 2022, on the Turcovid19 platform. In addition, city-level data is available as the number of cases per 100 000 people per week between February 8, 2021, and March 25, 2022. To examine the study on a seasonal scale, approximated equinox dates were determined as the start dates of the season. Consequently, the study encompasses one year following the onset of the pandemic in Türkiye, encompassing the dates between March 20, 2021, and March 18, 2022.

Figure 2 presents the weekly new cases and cumulative cases of the Covid-19 outbreak in Türkiye between March 20, 2021, and March 18, 2022. The study revealed that the cumulative number of cases, 3 149 094 at the beginning, reached 14 663 508 by the end of the one-year study period. Upon examination of the number of new cases on the graph, it becomes apparent that there is a discernible pattern of peaks in the increase in the number of cases. The maximum weekly number of new cases was observed between January 29, 2022 - February 4, 2022, with 708 159 new cases detected. In contrast, the minimum weekly number of new cases was observed in the week of July 3, 2021 - July 9, 2021, with 34 933 new cases detected.

The analyzed seasons comprise equal time intervals, each of which is 13 weeks long, equivalent to 91 days. Table 1 presents the temporal intervals demarcating the seasons investigated in this research.

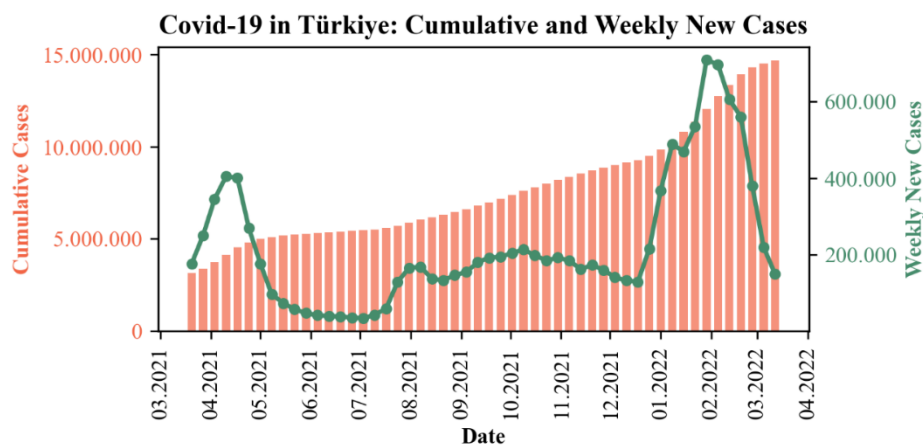


Figure 2: Weekly new case and cumulative case numbers of the Covid-19 outbreak in Türkiye (March 20, 2021- March 18, 2022)

Table 1: Time intervals of the seasons analyzed

#	Season	Time interval	Weeks	Days
1	Spring	20 March 2021 – 18 June 2021	13	91
2	Summer	19 June 2021 – 17 September 2021	13	91
3	Autumn	18 September 2021 – 17 December 2021	13	91
4	Winter	18 December 2021 – 18 March 2022	13	91
Overall			52	364

The seasonal and cumulative case numbers of the Covid-19 outbreak in Türkiye from March 20, 2021, to March 18, 2022, are presented in Figure 3. The graph demonstrates the cumulative and seasonal incidence of novel coronavirus infections in Türkiye. The cumulative number of cases, represented by the red line, exhibits a consistent increase from approximately 5 million at the end of the spring season to nearly 15 million during the winter months. The green bars illustrate the seasonal total number of new cases. In the one-year data analyzed in this study, the proportion of new cases recorded in spring was 20.4%, which decreased to 12.3% in summer and then increased slightly to 20% in autumn. The highest proportion, 47.3%, was observed in winter. This seasonal distribution indicates a substantial increase in new cases during the winter months, contributing significantly to the cumulative increase.

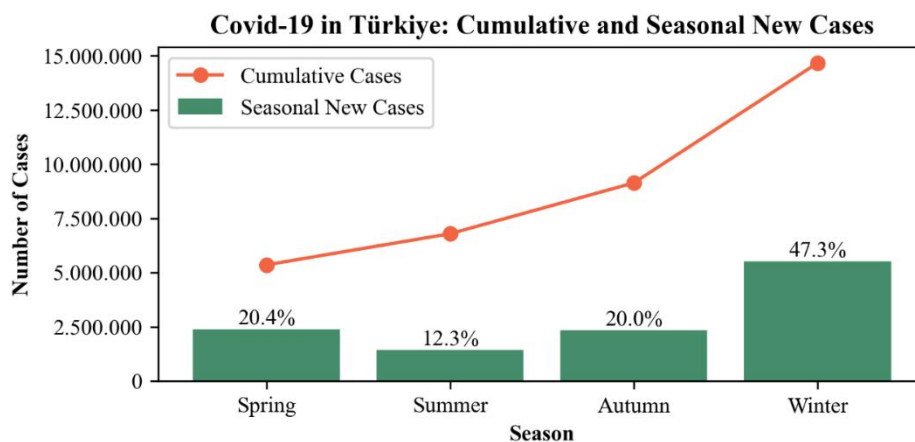


Figure 3: Seasonal case and cumulative case numbers of the Covid-19 outbreak in Türkiye (March 20, 2021- March 18, 2022)

Population data for Türkiye was collected from the Turkish Statistical Institute (TurkStat) at the city and district levels. According to the data, the country-level population is 84 680 273 in 2021 and 85 279 553 in 2022. The maximum population

lives in İstanbul, and the minimum population lives in Ardahan both in 2021 and 2022. While İstanbul's population is 15 840 900 in 2021, it is increasing to 15 907 951 in 2022. Ardahan's population is 39 130 in 2021, slightly changed in 2022 as it is 39 123. City populations are illustrated in Figure 4 in alphabetical order.

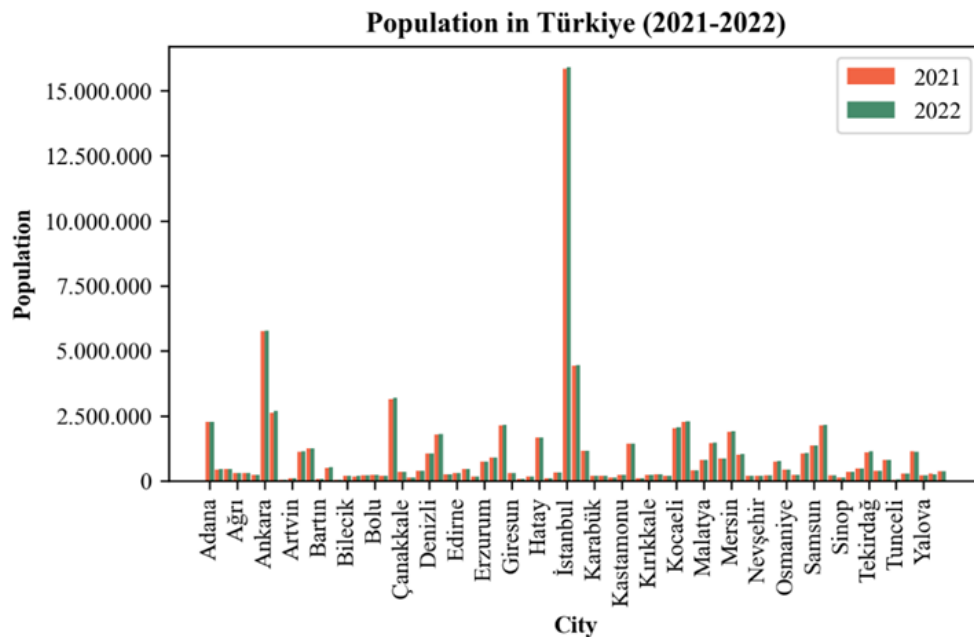


Figure 4: Population Statistics of Turkish Cities (2021-2022)

The average district population in Türkiye is 87 030 in 2021 and 87 646 in 2022. The lowest population is recorded in Konya, Yalılıyük as 1532 and 1710 in the years 2021 and 2022, respectively. In addition, the highest population is recorded in İstanbul, Esenyurt as 977 489 and 983 571, in the years 2021 and 2022, respectively.

The number of Covid-19 cases at the district level was not recorded by the authorities. Therefore, assuming it changes directly to the district population data, the seasonal number of Covid-19 cases was calculated at the district-level from city-level data by weighting it according to the population data.

Based on the seasonal Covid-19 case data at the city and district level and population data size, it is inconvenient to illustrate as a graph. Consequently, GIS tools are beneficial for analyzing spatial data, improving decision-making processes, and enhancing mapping and geographic analysis efficiency and accuracy. Additionally, interpolation techniques are invaluable in this context. These methods allow estimating Covid-19 case numbers in areas where data might be sparse or unavailable by using known data points to predict unknown values. Interpolation techniques can provide a more detailed and continuous surface of infection rates, helping public health officials identify potential hotspots, allocate resources more effectively, and implement targeted interventions. By leveraging these interpolation methods within GIS platforms, deeper insights are gained, and more precise spatial representations of the pandemic's impact are created.

In this study, seasonal changes in the spreading of Covid-19 are evaluated using IDW, RBF, Spline interpolation, and EBK interpolation techniques for city-level and district-level data. Employing multiple interpolation methods aims to assess their comparative effectiveness in accurately modeling the spatial distribution of Covid-19 cases across different geographic scales. Each interpolation method has unique characteristics and assumptions that can influence the results. For instance, IDW emphasizes closer data points more heavily, making it useful for areas with dense data. RBF can model smooth variations over space, while Spline interpolation can capture local trends and variations. EBK considers spatial

autocorrelation and can provide statistically optimal predictions (Ikechukwu et al., 2017). By applying a range of techniques, it is aimed to identify the most suitable methods for different scales of analysis and data distributions, thereby enhancing the robustness and reliability of our spatial analysis. This comprehensive approach allows for a better understanding of the seasonal patterns of Covid-19 and supports more targeted and effective public health interventions at city and district levels.

Table 2: Exposure risk classifications are according to seasonal Covid-19 case numbers at city and district levels

#	Number of seasonal Covid-19 cases (100.000)		Exposure risk
	City-level	District-level	
1	≤ 750	≤ 400	Very Low
2	≤ 1500	≤ 800	Low
3	≤ 2250	≤ 1200	Medium-Low
4	≤ 3000	≤ 1600	Medium
5	≤ 3750	≤ 2000	Medium-High
6	≤ 4500	≤ 2400	Moderate
7	≤ 5250	≤ 2800	Moderate-High
8	≤ 6000	≤ 3200	High
9	≤ 6750	≤ 3600	Very High

Seasonal Covid-19 cases data at the city and district level were organized as point data centered on the city and district locations. Then the raster data produced due to interpolation techniques were classified according to the determined statistical quantities proposed in Table 2.

The data distribution for each season was considered in determining the threshold values presented in Table 2. The data sets at the City and District levels were evaluated separately for this purpose. The average range was calculated using the range values (Table 3) of the seasonally separated data sets. The average range was then divided by nine, as the visualization will employ nine classes. The values were rounded to multiples of 250 for the city level and multiples of 100 for the district level to establish the threshold values.

The interpolated maps were evaluated through a comparison with the data allocated for control purposes. The seasonal data on cases of coronavirus disease 2019 (Covid-19) in provinces and districts determined for control purposes were compared with the values obtained by interpolations. The SD, MAE and RMSE were calculated.

3. Results and Discussion

In this study, interpolation methods were applied to evaluate spatiotemporal changes in the Covid-19 pandemic in Türkiye. Investigated seasons in 1 year period determined as follows: Spring, from 20 March 2021 to 18 June 2021; Summer, from 19 June 2021 to 17 September 2021; Autumn, from 18 September 2021 to 17 December 2021; and Winter, 18 December 2021 to 18 March 2022. The separation of these seasonal periods was conducted to capture variations in the number of cases in different periods, which can be influenced by factors such as weather, social behavior and public health interventions. Similarly, the objective of seasonal evaluation of Covid-19 data is also addressed by Ibarra-Bonilla (2023). All interpolation methods were applied using by seasonal number of Covid-19 cases per 100 000 people data on both city-level and district-level.

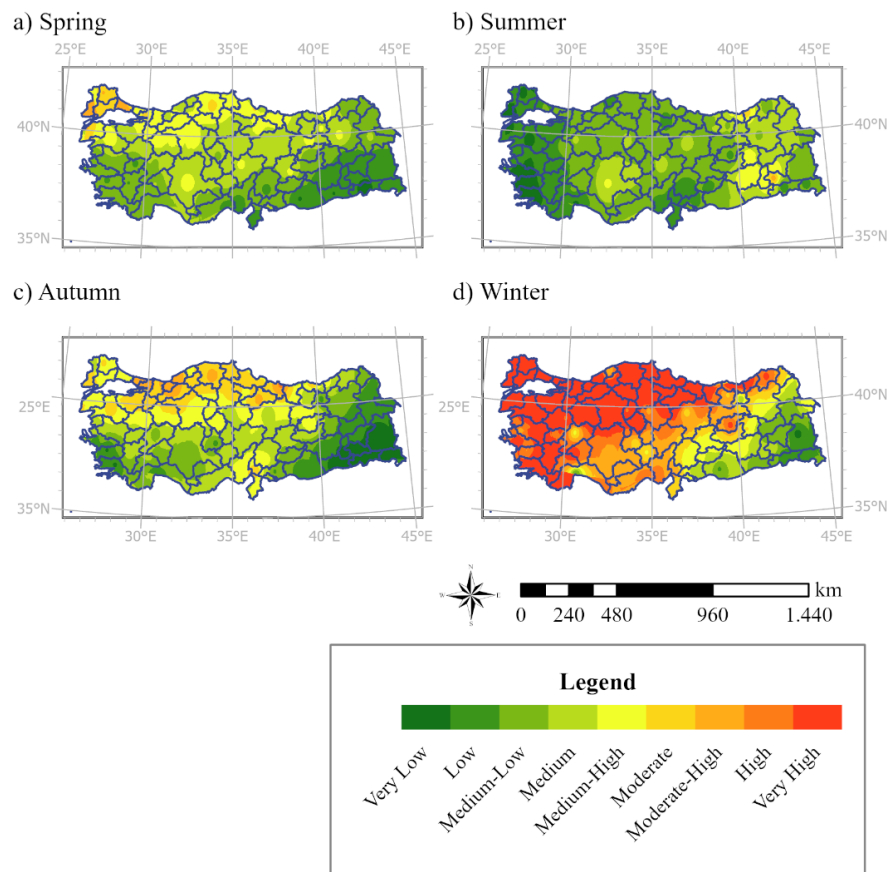
Table 3: Descriptive statistics of Covid-19 seasonal number of cases data

Level	Season	Average	Median	Minimum	Maximum	Range
City	Summer	2410.8	2425.4	410.2	5034.4	4624.2
City	Spring	1818.4	1687.6	411.2	4839.7	4428.5
City	Autumn	2753.2	2629.4	284.9	5394.8	5110.0
City	Winter	5497.0	5692.7	542.6	10723.1	10180.5
District	Summer	200.7	86.9	1.7	2527.8	2526.1
District	Spring	151.4	58.1	0.7	2545.2	2544.5
District	Autumn	229.2	87.8	0.8	3137.7	3136.9
District	Winter	457.6	191.8	1.6	5548.1	5546.6

Table 3 represents the descriptive statistical results of the data set used in this study. When one year of data was analyzed, it was already determined that most of the cases occurred in the winter season. Following the winter season, the distribution of the number of Covid-19 cases orders as spring, autumn, and summer, respectively. The observed increase in cases during the winter season can be attributed to the fact that cold weather conditions lead to an increased spread of respiratory tract infections. This increase is corroborated by [McClymont and Hu \(2021\)](#), who suggest that temperature is an important factor in the transmission of Covid-19.

Firstly, the IDW interpolation method was employed to process the city-level seasonal Covid-19 data for each season. The maps were reclassified according to the specified threshold values, thus providing a more straightforward interpretation. The maps produced with the IDW method and subsequently reclassified are presented in Figure 5.

Inverse Distance Weighted Interpolation - City Level

**Figure 5:** Covid-19 city-level seasonal number of cases distribution maps using IDW method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

The RBF interpolation method was applied to the city-level seasonal data set for each season relating to the incidence of Covid-19. The maps were reclassified according to the specified threshold values, thus enabling a more straightforward interpretation of the data. The maps produced with the RBF method and subsequently reclassified are presented in Figure 6.

Radial Basis Function Interpolation - City Level

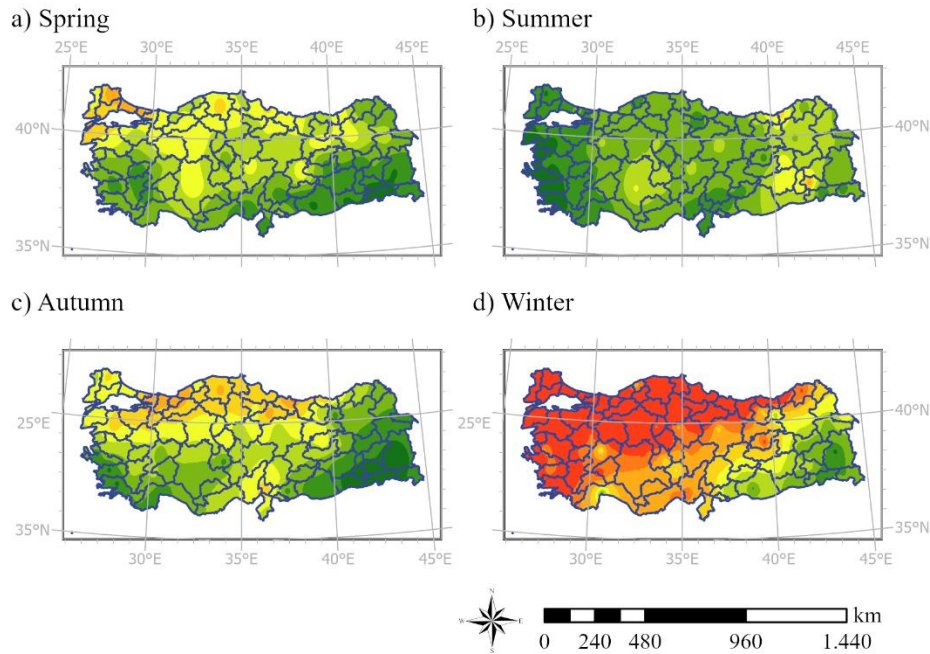


Figure 6: Covid-19 city-level seasonal number of cases distribution maps using RBF method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

The Spline interpolation method was utilized for the analysis of city-level seasonal data for Covid-19 for each season. All maps were reclassified according to the specified threshold values, thus providing a more straightforward interpretation. The maps produced with the Spline method and subsequently reclassified are presented in Figure 7.

Spline Interpolation - City Level

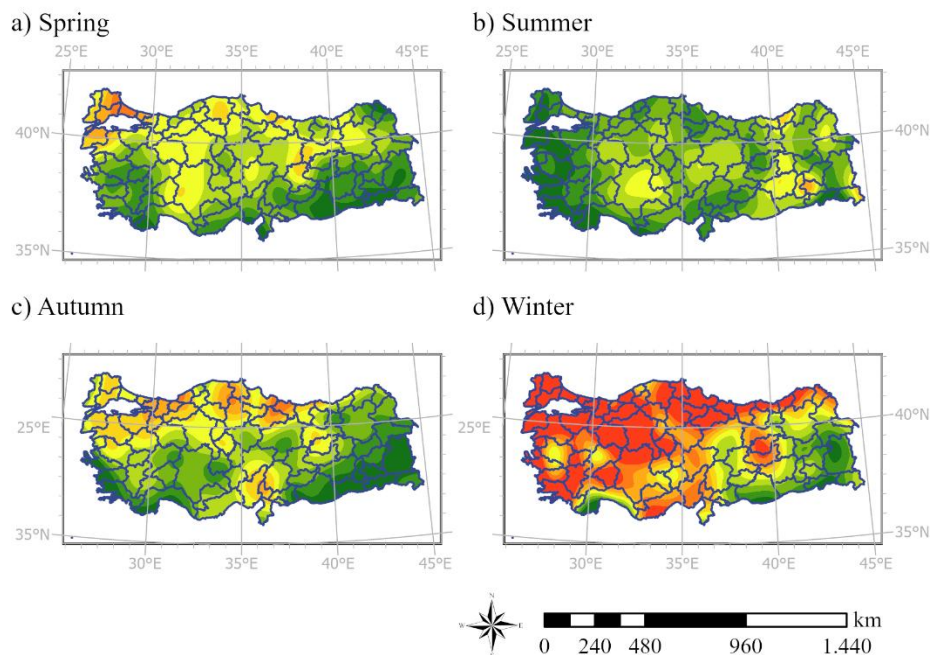


Figure 7: Covid-19 city-level seasonal number of cases distribution maps using Spline interpolation method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

EBK interpolation method was applied to the city-level seasonal Covid-19 data for each season. All the maps were reclassified by the specified threshold values for easier interpretation of maps. The produced with the EBK interpolation method and reclassified maps are represented in Figure 8.

Empirical Bayesian Kriging Interpolation - City Level

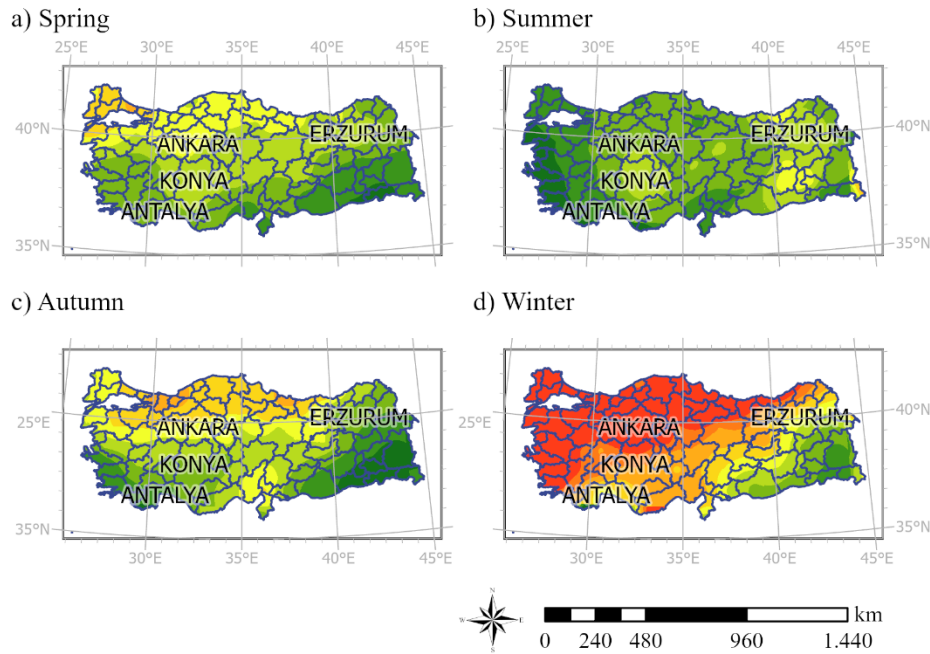


Figure 8: Covid-19 city-level seasonal number of cases distribution maps using EBK interpolation method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

Interpolation techniques have been utilized to generate continuous surfaces across the country, employing data on the number of cases of Covid-19 at the city level on a seasonal basis. This approach allows for the observation of geographical areas affected by the disease throughout the country and is employed for the visualization of spatial variations in case distribution. Notably, there was an increase in case densities during the winter and spring seasons in larger cities by area, such as Konya, Ankara, Antalya, and Erzurum, as can be observed on the maps.

Similarly, district-level seasonal number of cases distribution maps for Covid-19 were produced at the district level by performing the same interpolation methods to assess interpolation performance on different resolutions of the data. Additionally, this approach has enabled the determination of which districts of cities are most influenced by the disease.

Figure 9 illustrates the mapping of districts where cases of Covid-19 are concentrated seasonally, as determined by the IDW method. A comparison of city-level and district-level maps reveals that, while the concentration is more widespread at the city level, at the district level, the density in cities covering larger areas, decreases under the distribution of population.

The RBF method employed in the production of the interpolation map of district-level Covid-19 data does not reveal a strong concentration of cases in specific areas, as observed in Figure 10. Figure 11 illustrates the seasonal distribution of cases of Covid-19 generated by Spline interpolation. As can be observed in the maps, the regions where cases are concentrated exhibit a similar pattern to that observed with the IDW method.

Inverse Distance Weighted Interpolation - District Level

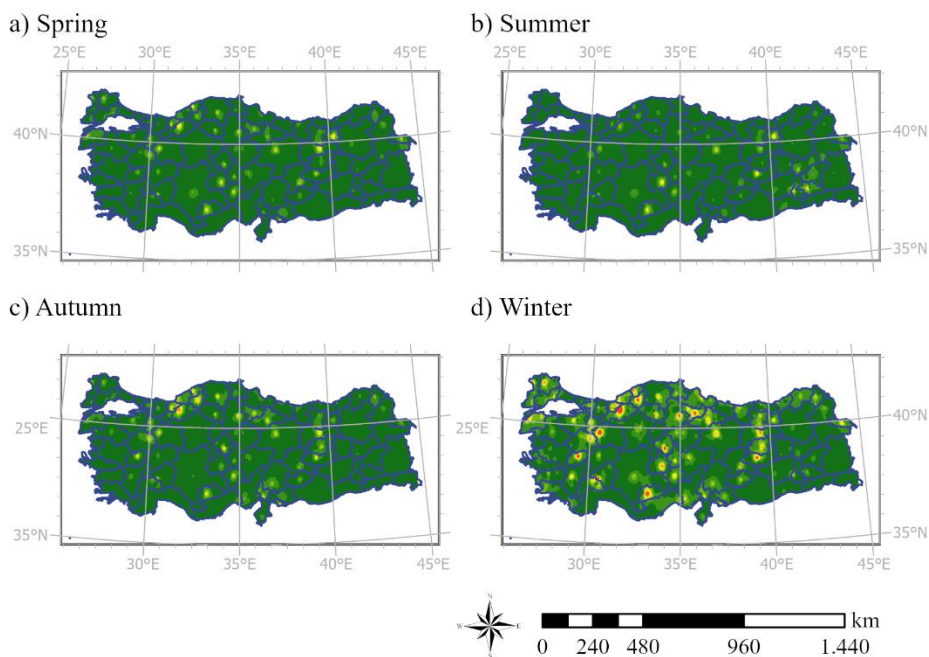


Figure 9: Covid-19 district-level seasonal number of cases distribution maps using IDW interpolation method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

Radial Basis Function Interpolation - District Level

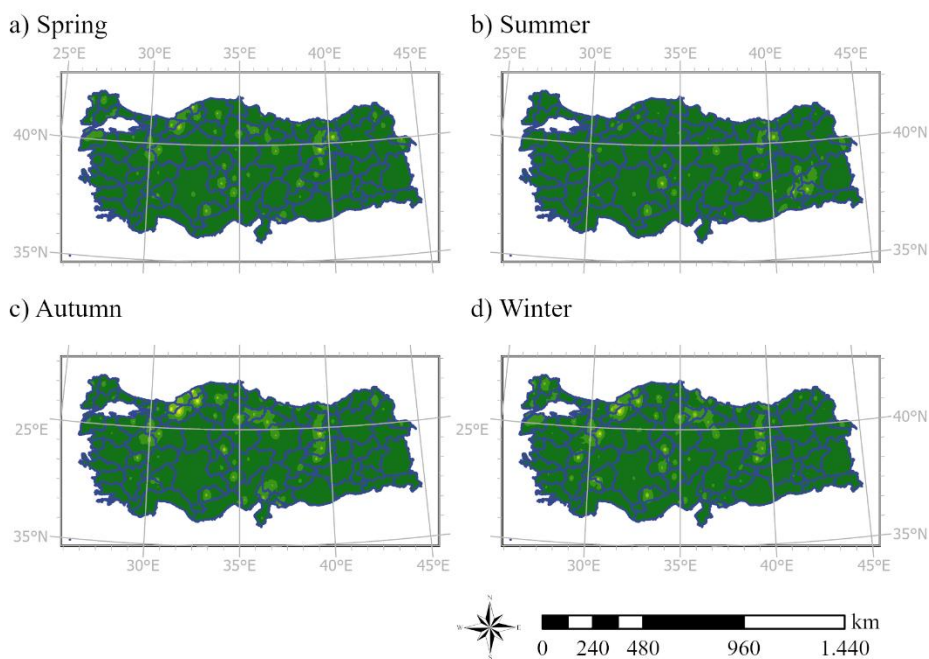


Figure 10: Covid-19 district-level seasonal number of cases distribution maps using RBF interpolation method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

Spline Interpolation - District Level

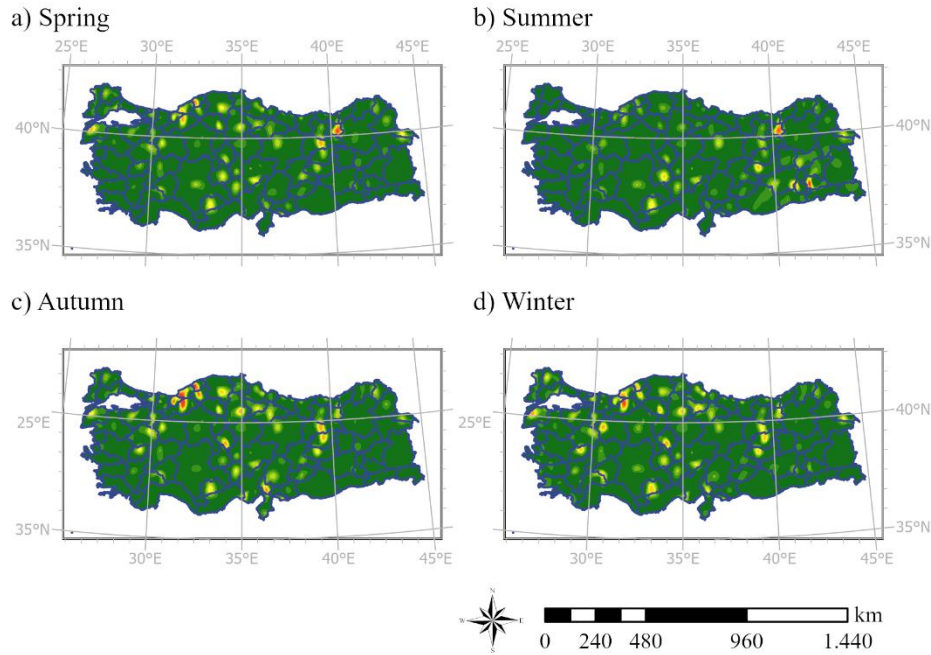


Figure 11: Covid-19 district-level seasonal number of cases distribution maps using Spline interpolation method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

Empirical Bayesian Kriging Interpolation - District Level

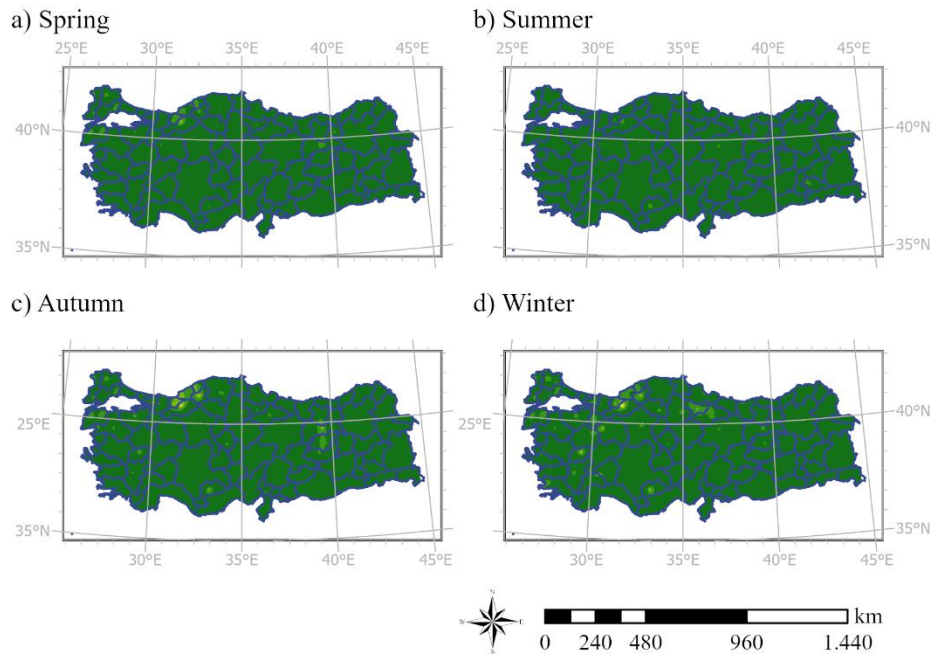


Figure 12: Covid-19 district-level seasonal number of cases distribution maps using EBK interpolation method: a) Spring, b) Summer, c) Autumn, d) Winter

The maps generated with the EBK interpolation method, as illustrated in Figure 12, exhibit similarities to those produced with the RBF interpolation model, as demonstrated in Figure 10. However, it is not possible to detect the presence of cases of Covid-19 at the district level in maps created with either the RBF or EBK methods.

Following the generation of the maps utilizing the presented interpolation techniques with seasonal case data for Covid-19, the validation of the resulting maps was carried out. The estimated values, which are extracted from the raster map correspond to 10% of the data in the dataset that was not employed in the model construction. Then estimated values and absolute values from control data were compared, and statistical calculations were performed. The findings are presented in Table 4.

Table 4 presents the statistical accuracy assessment results for the interpolation methods applied to both city-level and district-level seasonal Covid-19 case data. The evaluation metrics include the SD of absolute values, SD of estimated values, MAE, and RMSE.

Table 4: Statical accuracy assessment results

Level	Season	Method	SD (Absolute)	SD (Estimated)	MAE	RMSE
City	Spring	IDW	782.8	714.0	458.1	646.4
City	Summer	IDW	639.1	562.0	660.7	813.5
City	Autumn	IDW	1087.2	983.3	531.0	671.6
City	Winter	IDW	2028.7	2027.9	1438.9	1919.9
City	Spring	RBF	782.8	797.4	417.3	543.1
City	Summer	RBF	639.1	450.7	578.6	717.0
City	Autumn	RBF	1087.2	1043.1	522.1	655.5
City	Winter	RBF	2028.7	1779.7	1111.2	1238.2
City	Spring	Spline	782.8	1307.5	841.8	888.9
City	Summer	Spline	639.1	653.5	829.8	1009.6
City	Autumn	Spline	1087.2	1061.5	730.5	900.2
City	Winter	Spline	2028.7	2009.4	1598.1	1734.0
City	Spring	EBK	782.8	740.9	444.9	569.1
City	Summer	EBK	639.1	413.0	542.9	671.1
City	Autumn	EBK	1087.2	1067.0	494.5	607.7
City	Winter	EBK	2028.7	1778.8	1206.6	1286.7
District	Spring	IDW	323.5	206.9	161.1	300.3
District	Summer	IDW	314.9	155.1	121.9	278.6
District	Autumn	IDW	355.0	266.4	192.4	366.9
District	Winter	IDW	785.7	526.0	375.8	701.5
District	Spring	RBF	323.5	151.6	176.4	311.1
District	Summer	RBF	314.9	121.1	138.1	294.4
District	Autumn	RBF	355.0	220.5	203.6	371.9
District	Winter	RBF	785.7	384.6	408.8	738.7
District	Spring	Spline	323.5	429.4	300.8	477.1
District	Summer	Spline	314.9	322.9	216.8	364.3
District	Autumn	Spline	355.0	549.4	360.0	581.9
District	Winter	Spline	785.7	1147.6	726.4	1131.9
District	Spring	EBK	323.5	96.7	149.8	314.7
District	Summer	EBK	314.9	73.7	118.6	296.6
District	Autumn	EBK	354.9	164.7	167.4	361.3
District	Winter	EBK	785.7	269.8	352.9	736.9

3.1 City-Level Analysis

The IDW method shows relatively high MAE and RMSE values across all seasons, particularly during the winter season. This indicates that while IDW is effective in capturing local variations, it may struggle with accuracy in periods of high case density, such as winter. The method's performance is better during the spring and summer seasons, where case densities are lower, resulting in more accurate interpolations. Similarly, [Murugesan et al. \(2020\)](#) employed the Kriging and IDW methods to visualize the state-wise spatial distribution of the disease at the early stages of the pandemic in India, when the number of cases was low, and the density was relatively sparse. In this study, the authors demonstrated the efficacy of the IDW method in detecting and predicting potential disease risk.

RBF interpolation generally provides lower MAE and RMSE values compared to IDW, especially during the winter season. This suggests that RBF is more capable of smoothing spatial variations, making it a better choice when the data exhibits a strong gradient, as seen in the winter.

The Spline method consistently shows higher error metrics, particularly during the winter season, where both MAE and RMSE values are the highest among the interpolation methods. This result suggests that the Spline method may overfit the data, leading to less reliable predictions in cases of extreme variations.

EBK consistently outperforms the other methods, especially in the winter season, where it has the lowest MAE and RMSE values. This indicates that EBK's ability to account for spatial autocorrelation results in more accurate predictions, making it the most reliable method among those tested for high-density data scenarios.

3.2 District-Level Analysis

The IDW method produced the lowest MAE and RMSE values across all seasons at the district level. This indicates that IDW is highly effective for capturing local variations in data with lower spatial variability. Even during the winter season, where case variability tends to be higher, IDW outperformed the other methods with lower error values. This suggests that IDW is particularly well-suited for this scale and data set.

The RBF method yielded slightly higher MAE and RMSE values compared to IDW. However, it performed comparably well during the spring and summer seasons, producing results close to those of IDW. This suggests that RBF is a reliable method during seasons with less spatial variability, although it may not be as effective as IDW in more variable conditions.

The Spline method consistently showed the highest MAE and RMSE values across all seasons, particularly during the winter. This result indicates that the Spline method may be prone to overfitting, leading to less reliable predictions, especially in data sets with high spatial variability.

EBK produced the second-lowest error metrics, following IDW. While it performed well, particularly in the winter season, its MAE and RMSE values were slightly higher than those of IDW. This suggests that while EBK is a strong method, it may not be as well-suited as IDW for this specific district-level data set.

The analysis of interpolation methods across both city and district levels reveals distinct advantages and limitations for each approach. At the city level, EBK emerges as the most reliable method, particularly during periods of high case density, such as the winter season, due to its ability to effectively account for spatial autocorrelation. RBF also performs well, especially in the winter, showing a capacity for smoothing spatial variations. In contrast, IDW shows strong performance during periods of lower-case densities (spring and summer) but struggles with higher densities. The Spline method, however, exhibits the

highest errors, indicating potential overfitting and reduced reliability, particularly during extreme case variations. At the district level, IDW consistently outperforms other methods, demonstrating its effectiveness in handling data with lower spatial variability. Although EBK and RBF also perform well, IDW's lower MAE and RMSE values suggest that it is the most suitable method for district-level analysis. The Spline method again shows the highest error rates, underscoring its limitations in handling data with varying spatial characteristics. Overall, while EBK and IDW are generally the most reliable methods across different scales and conditions, Spline's tendency to overfit makes it less appropriate for these datasets.

4. Conclusion

The results of this study demonstrated that the period of highest incidence of cases of Covid-19 in Türkiye was winter. This finding is consistent with the prevalence of respiratory tract infections during the colder months. At the district level, the population-weighted dataset displayed lower deviation values in comparison to the city level, indicating that more detailed data leads to more accurate interpolation results. This study illustrated the efficacy of interpolation methods in identifying high-risk areas on a seasonal basis and provided strategic guidance for public health interventions. The findings provide a useful basis for understanding the spread of the pandemic and optimizing public health strategies. The data obtained can be used to identify risk areas for future outbreaks in advance and to develop appropriate response plans. Finally, the accurate modeling of spreading pandemics is of great importance for potential future pandemics, so that they may be understood, surveilled, and prevented from spreading.

Acknowledgements

Duygu Arican is a Ph.D. scholarship holder from the Council of Higher Education (YÖK) in the field of "GIS and Informatics Applications", which is one of the 100 national priority areas determined by YÖK within the scope of the YÖK 100/2000 Doctorate Program.

Author Contribution

Duygu Arican: Design, Literature review, Data Collection, Analysis and interpretation, Writing, Review of article. **Nursu Tunalioglu:** Conception, Design, Literature review, Supervision, Writing, Review of article.

Declaration of Competing Interests

The authors declare that they have no known relevant competing financial or non-financial interests that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Alemdar, K. D., Kaya, Ö., Canale, A., Çodur, M. Y., & Campisi, T. (2021). Evaluation of air quality index by spatial analysis depending on vehicle traffic during the COVID-19 outbreak in Turkey. *Energies*, 14(18), 5729.
- Bugdayci, I., Ugurlu, O., & Kunt, F. (2023). Spatial Analysis of SO₂, PM₁₀, CO, NO₂, and O₃ Pollutants: The Case of Konya Province, Turkey. *Atmosphere*, 14(3), 462.
- Cong Nhut, N. (2023). Kriging interpolation model: The problem of predicting the number of deaths due to COVID-19 over time in Vietnam. *EAI Endorsed Transactions on Context-Aware Systems and Applications*, 9(1).
- Franch-Pardo, I., Napoletano, B. M., Rosete-Verges, F., & Billa, L. (2020). Spatial analysis and GIS in the study of COVID-19. A

review. *Science of the total environment*, 739, 140033.

- Ibarra-Bonilla, J. S., Villarreal-Guerrero, F., Pinedo-Alvarez, A., & Prieto-Amparán, J. A. (2023). COVID-19 in Chihuahua, Mexico: Assessing its spatial behaviour through the inverse distance weighted interpolation technique. *The Canadian Geographies / Géographies Canadiennes*, 67(4), 470-483.
- Ikechukwu, M. N., Ebinne, E., Idorenyin, U., & Raphael, N. I. (2017). Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. *Journal of Geographic Information System*, 09(03), 354–371.
- Jedwab, R., Khan, A. M., Russ, J., & Zaveri, E. D. (2021). Epidemics, pandemics, and social conflict: Lessons from the past and possible scenarios for COVID-19. *World Development*, 147.
- Jia, H., Zang, S., Zhang, L., Yakovleva, E., Sun, H., & Sun, L. (2023). Spatiotemporal characteristics and socioeconomic factors of PM2.5 heterogeneity in mainland China during the COVID-19 epidemic. *Chemosphere*, 331.
- Johnson, N. P. A. S., & Mueller, J. (2002). Updating the accounts: global mortality of the 1918-1920" Spanish" influenza pandemic. *Bulletin of the History of Medicine*, 76(1), 105–115.
- Kang, D., Choi, H., Kim, J. H., & Choi, J. (2020). Spatial epidemic dynamics of the COVID-19 outbreak in China. *International Journal of Infectious Diseases*, 94, 96–102.
- Kırlangıçoğlu, C. (2022). Investigating the effects of regional characteristics on the spatial distribution of COVID-19 pandemic: a case of Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5).
- Kotan, B., & Erener, A. (2023). Seasonal analysis and mapping of air pollution (PM10 and SO2) during Covid-19 lockdown in Kocaeli (Türkiye). *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(2), 173–187.
- Kumar, J., Sahoo, S., Bharti, B. K., & Walker, S. (2020). Spatial distribution and impact assessment of COVID-19 on human health using geospatial technologies in India. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(5), 57–64.
- Li, J., & Heap, A. D. (2008). *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists*.
- McClymont, H., & Hu, W. (2021). Weather variability and COVID-19 transmission: A review of recent research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 396.
- Murugesan, B., Karuppanan, S., Mengistie, A. T., Ranganathan, M., & Gopalakrishnan, G. (2020). Distribution and Trend Analysis of COVID-19 in India: Geospatial Approach. *Journal of Geographical Studies*, 4(1), 1–9.
- Taubenberger, J. K., & Morens, D. M. (2006). 1918 Influenza: the mother of all pandemics. *Revista Biomedica*, 17(1), 69–79.
- Uçar, A., Arslan, Ş., Manap, H., Gürkan, T., Çalışkan, M., Dayıoğlu, A., Efe, H., Yılmaz, M., İbrahimoglu, A., Gültekin, E., Durna, R., Başar, R., Osmanoglu, F., & Ören, S. (2020). Türkiye’de Covid-19 Pandemisinin Monitörizasyonu İçin Interaktif Ve Gerçek Zamanlı Bir Web Uygulaması: TURCOVID19. *Anatolian Clinic the Journal of Medical Sciences*, 25(Special Issue on COVID 19), 154–155.
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., Zhao, X., Huang, B., Shi, W., Lu, R., Niu, P., Zhan, F., Ma, X., Wang, D., Xu, W., Wu, G., Gao, G. F., & Tan, W. (2020). A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019. *New England Journal of Medicine*, 382(8), 727–733.
- URL-1: Republic of Türkiye Ministry of Health. (2021, March 11). *Bakan Koca, Türkiye’nin Kovid-19’la 1 Yıllık Mücadele Sürecini Değerlendirdi*. <https://www.saglik.gov.tr/TR,80604/bakan-koca-turkiyenin-kovid-19la-1-yillik-mucadele-surecini-degerlendirdi.html> (Accessed: 1 September 2024).
- URL-2: World Health Organization. (2023, May 5). *Virtual Press conference on COVID-19 and other global health issues transcript - 5 May 2023*. <https://www.who.int/publications/m/item/virtual-press-conference-on-covid-19-and-other-global-health-issues-transcript--5-may-2023> (Accessed: 1 September 2024).
- URL-3: Republic of Türkiye Ministry of Interior. (2020, December 1). *Koronavirüs ile Mücadele Kapsamında - Yeni Kısıtlama ve Tedbirler Genelgesi*. <https://www.icisleri.gov.tr/koronavirus-ile-mucadele-kapsaminda-sokaga-cikma-kisitlamalari---yeni-kisiltlama-ve-tedbirler-genelgeleri> (Accessed: 1 September 2024).

Konumsal-zamansal taşınmaz değer değişim dinamiklerinin CBS ve istatistiksel analiz teknikleri ile incelenmesi

Süleyman Şişman¹ , Nilay Tellioğlu¹ , Arif Çağdaş Aydınoğlu^{1*} 

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli, Türkiye.

Öz: Taşınmazların konum ve zamana bağlı olarak değer değişim dinamiklerinin analizi, taşınmaz piyasasında stratejik ve etkin kararlar alma sürecinde büyük öneme sahiptir. Taşınmazların değer değişimini etkileyen zamana bağlı ekonomik değişkenlerin istatistiksel tekniklerle modellenmesi, yatırımcılara ve politika yapıcılara önemli altlıklar sunabilmektedir. Bu çalışmada konut tipindeki taşınmazların konumsal-zamansal değer değişim dinamiklerinin belirlenebilmesi için değer değişimi üzerinde etkili olabilecek 14 ekonomik değişken belirlenmiştir. İstanbul'un Pendik ve Tuzla ilçeleri ile Kocaeli ilinin Gebze, Çayırova ve Darıca ilçelerindeki mahalleler çalışma alanı olarak belirlenmiş olup, değişkenler ve taşınmaz değer veri setleri 2019-2023 dönemi için temin edilmiştir. İstatistiksel analiz tekniklerinden Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) kullanılarak taşınmaz değer değişimi ile ekonomik değişkenler arasındaki ilişkiyi incelemek için regresyon modeli oluşturulmuştur. Değer değişimindeki varyansın %63.3'ünü açıklayan modelde Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE), Yurt İçi Üretici Fiyat Endeksi (Yİ-ÜFE), İktisadi Faaliyet Kollarına Göre Gayrisafi Yurt İçi Hasıla Değişim Oranları (Gayrimenkul), Bankalarca Açılan Kredilere Uygulanan Ağırlıklı Ortalama Faiz Oranları (Konut), Türk Lirası Arzı, Tüketici Kredileri (Konut) ve Döviz Kurları değişimi değişkenleri istatistiksel açıdan anlamlı olarak tespit edilmiştir. Konumsal-zamansal değer değişimlerini incelemek için ise Konum-Zaman Küp Modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan küp ile CBS tabanlı Konumsal-Zamansal Trend Analizi, Yükselen Sıcak Konum Analizi ve Yerel Kümelene ve Aykırılık Analizleri gerçekleştirilmiştir. Konumsal-Zamansal Trend Analizi ile tüm mahallelerin %99 güven aralığında yükselme trendi gösterdiği belirlenmiştir. Yükselen Sıcak Konum Analizi ile Ardışık Sıcak Konum ve Salımlı Sıcak Konum kategorilerinde zamansal örüntüler belirlenmiştir. Yerel Kümeleme ve Aykırılık Analizi ile Tuzla ilçesindeki Cami Mahallesi ve Pendik ilçesindeki Harmandere Mahallesi'nin Yüksek-Yüksek Kümelene kategorisinde olduğu, diğer mahallelerin ise Çoklu Tip kategorisinde olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma ekonomik değişkenler ve değer değişimi arasındaki ilişkilerin regresyon modelleri ile incelenilmesinin yanı sıra konumsal-zamansal değer değişimlerinin Konum-Zaman Küpü temelli analizler ile konumsal olarak izlenebilmesine yönelik bütünlük bir metodoloji sunmaktadır. Önerilen hibrit yaklaşım konumsal-zamansal değer değişim dinamiklerinin belirlenmesi ve taşınmaz sektöründe doğru stratejiler geliştirilmesinde kullanılabilir.

Anahtar Sözcükler: CBS, Konum-Zaman Küpü, Taşınmaz Değer Değişimi, Çoklu Doğrusal Regresyon

Investigating spatio-temporal real estate value fluctuation dynamics with GIS and statistical analysis techniques

Abstract: Analysing the dynamics of value change in real estate depending on location and time is of great importance in the process of making strategic and effective decisions in the real estate market. Modelling the time-dependent economic variables affecting the change in the value of real estate with statistical techniques can present important bases for investors and policymakers. In this study, 14 economic variables that may affect the value change were determined to determine housing real estate's spatial-temporal value change dynamics. Pendik and Tuzla districts of Istanbul and Gebze, Çayırova and Darıca districts of Kocaeli city were determined as the study area, and variables and real estate value datasets were obtained for the period 2019-2023. Multiple Linear Regression (MLR), one of the statistical analysis techniques, was used to create a regression model to examine the relationship between the change in real estate value and economic variables. In the model explaining 63.3% of the variance in the change in value, the variables Consumer Price Index (CPI), Domestic Producer Price Index (DPPPI), Rates of Change in Gross Domestic Product (GDP) By Kind of Economic Activity (Real Estate), Weighted Average Interest Rates Applied to Loans Extended by Banks (Housing), Money Supply of Turkish Lira, Consumer Loans (Housing) and Change in Exchange Rates were determined to be statistically significant. To analyse the spatio-temporal value changes, a Spatio-Time Cube Model was created. With the cube created, GIS-based Spatio-Temporal Trend Analysis, Emerging Hot Spot Analysis and Local Clustering and Outlier Analyses were performed. With the Spatio-Temporal Trend Analysis, it was determined that all neighbourhoods show an up-trend within 99% confidence level. Temporal patterns in the categories of Consecutive and Oscillating Hot Spot were identified with the Emerging Hot Spot Analysis. Local Clustering and Outlier Analysis revealed that Cami Neighbourhood in Tuzla district and Harmandere Neighbourhood in Pendik district are in the High-High Clustering category, while the other neighbourhoods are in the Multiple Type category. This study presents an integrated methodology for analysing the relationships between economic variables and value change with regression models, as well as for spatially monitoring spatio-temporal value changes by using Space-Time Cube based analyses. The proposed hybrid approach can be used to determine the spatio-temporal value change dynamics and to develop the feasible strategies in the real estate sector.

Keywords: GIS, Space-Time Cube, Real Estate Value Fluctuation, Multiple Linear Regression

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 262 605 2061

Geliş Tarihi/Received: 20.11.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 13.01.2025



0000-0002-0924-1092, ssisman@gtu.edu.tr (Şişman S.)
0009-0001-6488-1738, nilaytellioğlu@gmail.com (Tellioğlu N.)
0000-0003-4912-9027, aydinoglu@gtu.edu.tr (Aydınoğlu A.Ç.)*

1. Giriş

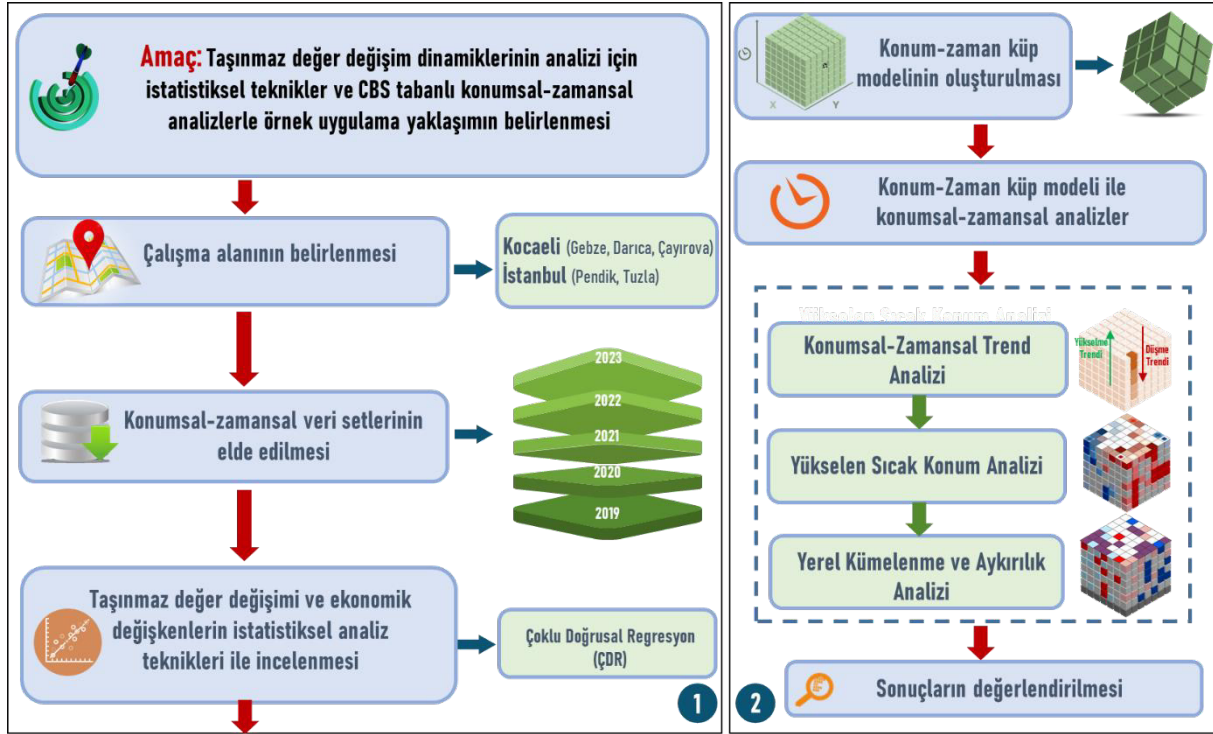
Gelişmekte olan ülkelerde taşınmaz sektörü, ekonomik büyümenin temel dinamiklerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Taşınmazlar, hem bir tüketim hem de bir yatırım ve üretim aracı olarak sosyo-ekonomik sistemin merkezinde yer almakta ve ekonomiyle yakından ilişkili bir sektör olarak değerlendirilmektedir (Ertürk & Sam, 2016; Ören & Yüksel, 2013). 2019 yılında T.C. Cumhurbaşkanlığı Finans Ofisi tarafından yapılan Türkiye'de Hane Halkının Finansal Algı ve Tutumu araştırmasında, katılımcıların %80'den fazlası, konut yatırımlarını diğer yatırım araçlarına (örneğin altın, vadeli TL mevduatı) göre daha kârlı ve güvenli bulduğunu belirtmiştir (URL-1). Konut yatırımının bu denli tercih edilmesinin nedenleri arasında uzun vadede değer kaybetmemesi ve diğer yatırım araçlarına nispeten daha yüksek getiri sağlaması yer almaktadır. Özellikle yüksek enflasyon dönemlerinde konut arzında azalma gözlemlenmesi taşınmazların enflasyondan korunma aracı ve yüksek getiri sağlayan bir yatırım unsuru olarak algılanmasına yol açmaktadır. Bu durum ise taşınmazlarla olan talep ve fiyatlarda kayda değer artışlar meydana getirmektedir (Erkek vd., 2020). Ayrıca şehirlerdeki hızlı nüfus artışı, ekonomik faktörler gibi birçok faktör, piyasanın dinamiklerini derinden etkilemektedir (Arslan, 2007). Ancak son dönemdeki ekonomik gelişmeler taşınmaz sektörü üzerinde önemli etkiler yaratmıştır. 2019-2023 yılları arasında inşaat maliyet endeksi önemli ölçüde artmıştır. Özellikle 2021'de %40'ların üzerinde artış gözlenirken, 2022 yılında bu oran %90'ı aşmıştır (URL-2). Döviz kuru dalgalanmaları ve enflasyondaki hızlı artış, inşaat maliyetlerini yükseltmiş ve konut fiyatları üzerinde baskı oluşturmuştur. Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) de bu dönemde önemli bir yükseliş yaşamıştır. 2021 yılında enflasyon %36 iken, 2022 yılında %64'e ulaşmıştır (URL-3). Yüksek enflasyon özellikle sabit gelirli hanelerin konut alım gücünü olumsuz etkileyerek konut talebini sınırlamıştır. Konut kredisi faiz oranları bu dönemde dalgalı bir seyir izlemiştir. Özellikle 2021 ve 2022 yıllarında faiz oranları %20'nin üzerine çıkarak konut talebini kısıtlamış ve konut fiyatlarındaki artışları baskılamıştır (URL-4). Bu çerçevede özellikle enflasyon, faiz oranları ve döviz kuru gibi ekonomik faktörler konut talebini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyerek fiyatlarda dalgalanmalara neden olmaktadır. Döviz kurlarındaki belirsizlikler ve enflasyonun artışı inşaat maliyetlerini yükseltip arzı daraltırken, faiz oranlarındaki değişimler ise hane halkının krediye erişimini zorlaştırmakta ve talebi sınırlamaktadır. Bu ekonomik dinamikler konut fiyatlarının arz-talep dengesine bağlı olarak hızlı bir şekilde dalgalanmasına yol açmaktadır (Erdoğan & Memduhoğlu, 2019). Bu bağlamda taşınmaz sektörüne etki eden ekonomik faktörlerin belirlenmesi sadece mevcut piyasa dinamiklerini anlamakla kalmayıp aynı zamanda gelecekteki ekonomik yatırımların yönlendirilmesi ve stratejik karar alma süreçlerinin optimize edilmesi açısından da kritik bir öneme sahiptir.

Literatürde taşınmaz değer değişimini etkileyen ekonomik değişkenlerin yer aldığı modelleme çalışmaları irdelendiğinde; Akça (2023) Türkiye'de konut fiyatlarındaki zamansal değişimin enflasyon, döviz kuru, konut faiz oranı ve konut kredileri gibi makro-ekonomik göstergelerle olan ilişkisini regresyon analizi ile incelemiştir. Konut fiyatlarının kısa vadede faiz oranları ve konut hacminden, uzun vadede ise toplam konut kredilerinden etkilendiğini ifade etmişlerdir. Çetin (2021) Türkiye'deki konut fiyatlarını etkileyen faktörler ve nedensellik ilişkisini incelemek için kurduğu regresyon modelinde konut fiyat endeksi bağımlı değişken olmak üzere, konut kredisi ağırlıklı ortalama faiz oranı, bankacılık sektörü konut kredileri, TÜFE bazlı reel efektif döviz kuru, sanayi üretim endeksi, inşaat malzemeleri toptan eşya fiyat endeksi, tüketici fiyat endeksi ve reel kira endeksi gibi ekonomik faktörleri kullanarak konut fiyatlarını etkileyen faktörlerin nedensellik ilişkilerini incelemiştir. Zandi vd. (2015) konut mülkiyetini, konut fiyat endeksi, enflasyon oranı, Gayrisafi Yurtiçi Hâsıla (GSYH), konut faiz oranları gibi değişkenlerinin etkisini regresyon modeli ile incelemiştir. Ayrıca değişkenler arasındaki ikili ilişkiyi korelasyonlarına göre değerlendirmiş olup, pozitif yönde en güçlü ilişkinin kredi faiz oranları olduğu ikinci en güçlü ekonomik değişkenin ise GSYH olduğunu tespit etmişlerdir. Karadağ ve Salihoğlu (2020), Türkiye'deki konut fiyatlarını hedonik konut fiyat endeksi ile incelemiş ve tüketici fiyat endeksi, sanayi üretim endeksi, inşaat malzemeleri fiyat endeksi, konut kredisi faiz oranları ve konut kredilerini analiz etmiştir. Konut kredisi faiz oranları ve tüketici fiyat endeksinin konut fiyatlarını negatif, sanayi üretim endeksinin ise pozitif yönde etkilediğini ifade etmişlerdir. Gebeşoğlu (2019), Türkiye'de

konut fiyat endeksi ile GSYH, döviz kurları, faiz oranları ve Borsa İstanbul (BIST100) getirileri arasındaki ilişkileri incelemiştir. BIST100 getirilerindeki artış, konut fiyatlarını düşürürken, döviz kurlarındaki değişimin konut sektöründe de dalgalanmalara sebebiyet verebileceğini ifade etmişlerdir. [İslamoğlu ve Nazlıoğlu \(2019\)](#), İstanbul, Ankara ve İzmir illerinde konut fiyat endeksi ile konut satış sayısı, sanayi üretim endeksi, inşaat maliyetleri endeksi, nüfus, yapı kullanım izin belgesi ve tüketici fiyat endeksi arasındaki ilişkiyi incelediği çalışmada konut fiyat endeksi ile enflasyon, nüfus, konut talebi arasında pozitif anlamlı bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. [Cunha ve Lobão \(2019\)](#) konut fiyatlarına etki eden faktörleri; Avrupa Birliği'nin tamamı, 28 Avrupa Birliği ülkesi, bir Avrupa Birliği ülkesi (Portekiz) ve 25 Portekiz metropol istatistiksel bölgesi olmak üzere dört farklı coğrafi düzeyde incelemiştir. Çalışmada iki zaman serisi ve iki panel veri regresyon modeli kullanılarak, taşınmaz fiyatlarını etkileyen faktörler ve konut fiyat endeksleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, GSYH, faiz oranları, konut başlangıçları ve turizm gibi belirleyicilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ancak her coğrafi seviyede farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca önceki dönem fiyat değişikliğinin mevcut dönem fiyat değişikliğini etkileyen en önemli belirleyici olduğunu ifade etmişlerdir. [Kiel ve Zabel \(2008\)](#) konut fiyatlarının belirlenmesinde Hedonik Regresyon analizi ile oda sayısı, bina yaşı, ısıtma sistemi gibi yapısal değişkenler; medeni durum, eğitim durumu, gelir, cinsiyet gibi mülkiyet sahibinin özellikleri; bölgede yaşayan kişilerin ortalama geliri, bölgedeki taşınmaz alım-satım hareketliliği, bölgedeki yoksulluk oranı, işsizlik oranı gibi mahalli özellikler ile üç farklı coğrafi seviyede (sokak, kasaba ve metropoliten istatistik alanı) tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Daha doğru modelleme sonuçları için coğrafi kriterlerin modellere dahil edilmesinin önemini vurgularken, farklı coğrafi seviyelerdeki verilerin konut fiyatları üzerine her seviyede bağımsız etkileri olduğunu ifade etmişlerdir. Diğer taraftan [Türk vd. \(2017\)](#) Ankara ilindeki dokuz merkez ilçede konut fiyatlarını tahmin etmek için Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) analizi tekniği ile tahmin modeli geliştirmişlerdir. Modele alan, bina yaşı, merkezi ısıtma, asansör, otopark, ebeveyn banyosu bulunması gibi yapısal değişkenleri dahil etmişlerdir. Modelleme sonuçlarını CBS ortamında tematik haritalar ile kullanıcılara sunmuşlardır. [Kitapci vd. \(2017\)](#) benzer şekilde Ankara ilinin dokuz merkez ilçesinde Yapay Sinir Ağları (YSA) ile 2013 Ocak- 2013 Aralık ayları arasındaki veri seti ile konut fiyatlarını tahmin etmişlerdir. Oluşturdukları tahmin modelinde alan, oda sayısı, banyo sayısı, ısı yalıtımı, site içinde bulunma, bina yaşı, şehir merkezine yakın olma, metro istasyonuna yakın olma gibi 15 değişken kullanmışlardır. Modelin yaklaşık %78 tahmin başarısına ulaştığını ifade etmişlerdir. Diğer taraftan [Erdoğan ve Memduhoğlu \(2019\)](#) Türkiye’de ilçe düzeyinde taşınmaz satış sayıları ve 100 000 kişiye düşen satış sayılarındaki konumsal-zamansal eğilimleri CBS tabanlı değerlendirmişlerdir. 2004-2017 yılları arası dönemi kapsayan bir Konum-Zaman Küp modeli oluşturarak, dört farklı senaryoda Yükselen Sıcak Konum Analizi ve Yerel Kümelenme ve Aykırılık Analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarını konut fiyat endeksi, nüfus, taşınmaz satış istatistikleri, enflasyon, döviz kuru, faiz oranı gibi faktörlerle ilişkili olarak yorumlamışlardır. [Rabiei-Dastjerdi ve McArdle \(2021\)](#), Dublin konut piyasasını CBS tabanlı bir yaklaşımla incelemiştir. Konum-Zaman Küp analiz yöntemi kullanılarak, Dublin'in farklı bölgelerinde konut fiyatları ve satış sayılarındaki değişimler, sosyoekonomik faktörler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Brexit ve COVID-19 gibi krizlerin yanı sıra mahalle özellikleri ve konut gelişim projeleri gibi mikro düzey faktörlerin satışlara etkisi analiz edilmiştir. Sonuç olarak Dublin'deki konut piyasasında yaşanan dengesizliklerin şehirdeki sosyal ve ekonomik yapıyı derinleştiren bir eşitsizliğe işaret ettiği ifade edilmiştir. Fakat bu çalışmaların çoğunda konut türündeki taşınmazların zamansal değer değişimine etki eden ekonomik değişkenlerin belirlenmesi ve analiz edilmesi ya da il ve ilçe düzeyinde taşınmaz satış istatistiklerinin CBS tabanlı değerlendirilmesine ayrı ayrı odaklanılmıştır. Hem konumsal-zamansal değer değişiminin CBS tabanlı yeni nesil analiz teknikleri ile değerlendirilmesi hem de değer değişimi üzerinde önemli etkiye sahip olan zamansal ekonomik değişkenlerin modellenmesi bütüncül bir şekilde yeterince ele alınmamıştır.

Bu çalışmada farklı konut tipindeki taşınmazların konumsal-zamansal taşınmaz değer değişim dinamiklerinin analiz edilmesine yönelik uygulama yaklaşımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda taşınmaz değer değişim

dinamiklerinin zamansal ekonomik değişkenler ile ilişkisi istatistiksel ÇDR tekniği ile incelenmektedir. Taşınmaz değer değişimlerinin konum ve zamana bağlı olarak analiz edilmesinde ise Konum-Zaman Küp Modeli oluşturulmuş ve bu model ile konumsal-zamansal analiz süreci ele alınmıştır. Böylelikle taşınmaz değer değişim dinamiklerinin analizi için istatistiksel teknikler ve konumsal-zamansal analizlere dayalı örnek yaklaşım geliştirilmiştir. Bu bağlamda çalışma kapsamında kullanılan yöntemler, veri işleme süreçleri ve yöntemlerinin uygulama aşamaları için izlenen metodoloji Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: Çalışma iş akışı süreci

2. Materyal ve Metot

2.1 Çoklu Doğrusal Regresyon

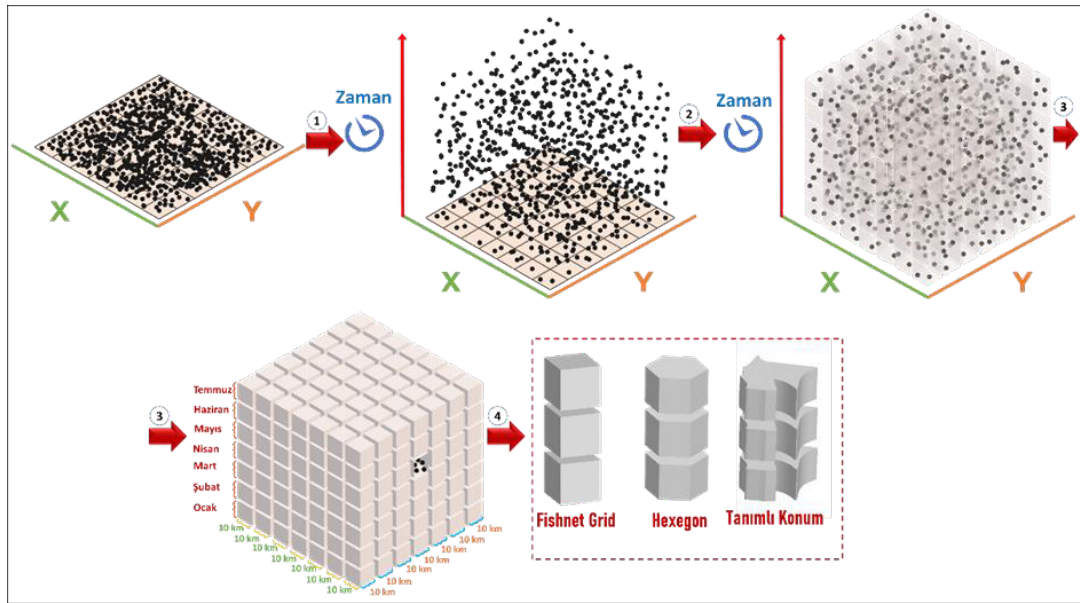
ÇDR analizi bir bağımlı değişkenin birden fazla bağımsız değişkenle olan ilişkisini matematiksel bir model yardımıyla analiz etmeye yönelik yaygın biçimde kullanılan istatistiksel bir tekniktir (James vd., 2023). Bu teknik ile bağımsız değişkenler kullanılarak oluşturulan model yardımıyla bağımlı değişkenin tahmini yapılır. Bağımsız değişkenlerin etkisi eş zamanlı olarak incelenirken, modele dahil edilecek değişkenlere bağlı olarak bağımlı değişken üzerindeki değişimin de analiz edilmesine olanak tanır. ÇDR, değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri anlamak ve bağımlı değişkenin davranışını daha doğru tahmin etmek için güçlü bir teknik olup, matematiksel modeli aşağıdaki eşitlik ile verilir (Yalprı, 2018):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \dots + \beta_n \times X_n + \varepsilon_i \quad (1)$$

Eşitlikte yer alan y_i bağımlı değişkeni; $X_1, X_2, \dots, X_n$ modele dahil edilen bağımsız değişkenleri; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ bu değişkenlerin model katsayılarını ifade etmektedir. ε_i ise oluşturulan regresyon modeli ile bağımlı değişken için tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farkı temsil eden hata terimini ifade etmektedir.

2.2 Konum Zaman Küp Modeli

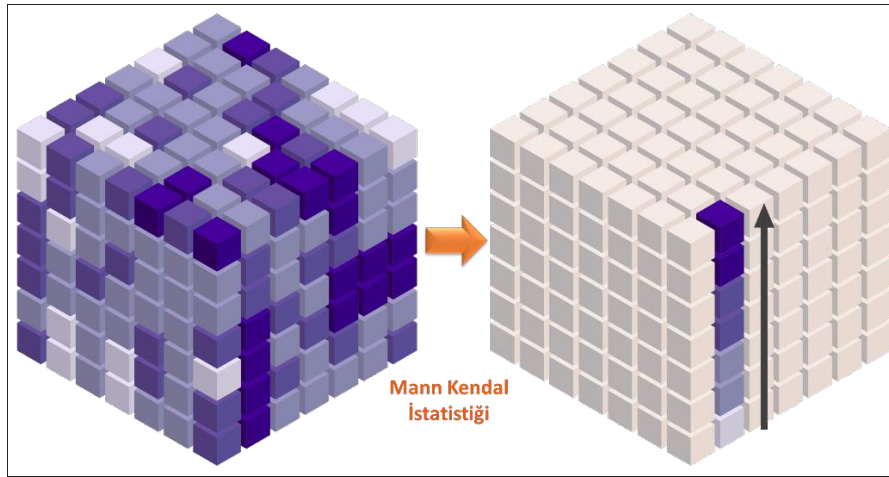
Konum-Zaman Küp (Space Time Cube) Modeli mekân-zaman ortamındaki insan davranışlarının yanı sıra hareketliliği etkileyen çeşitli kısıtlamalar arasındaki ilişkileri araştırmak için yirminci yüzyılın ortalarında geliştirilmiştir (Hägerstrand, 1970; Kveladze vd., 2019). Konum-Zaman Küpü, çeşitli konum-zamana bağlı analizlerin temelini oluşturmakta ve birçok alanda da kullanılmaktadır. Bu küpler bir zaman serisi modelinde meydana gelen konum tabanlı olayların konumsal-zamansal dinamiklerini analiz etmek ve anlamak için büyük fayda sağlamaktadır (Zhang vd., 2021). Bir Konum-Zaman Küpü'nün görsel sunumunda, konum ve zaman ayrılmaz parçalar olarak kabul edilmektedir. Konum-Zaman Küpü oluşturmak için, herhangi bir veri setinde konumlarla ilgili konumsal-zamansal bilgiler ayrı ayrı küçük kutulardan (küplerden) oluşan veri bileşenleri olarak NetCDF veri formatında tanımlanmaktadır (Bennett vd., 2020). Şekil 2'de temel bileşenleri ifade edilen bir küpte yatay X ve Y düzlemleri konumu, dikey eksen ise zaman bileşenini ifade etmektedir. Uygulama işlem sürecinde görüldüğü gibi 2 boyutlu (2B) olarak tanımlanan verilere zaman boyutunun da eklenmesiyle Fishnet, Hexagon ya da tanımlı alansal sınırlara (örneğin mahalle, ilçe, il sınırı gibi) göre 3 boyutlu (3B) Konum-Zaman Küp modelleri oluşturulabilmektedir. Ayrıca küpte her bir kutu için konumsal, zamansal ve konum-zaman komşuları tanımlanmaktadır (Kveladze vd., 2019; Mo vd., 2020).



Şekil 2: Konum-Zaman Küpü oluşturma süreci

2.3 Konumsal Zamansal Trend Analizi

Trend analizi veri setindeki zamansal bilgi içeren herhangi bir değişkene göre oluşturulan Konum-Zaman Küpü'nü girdi olarak kullanmaktadır (Şekil 3). Mann Kendall istatistiği zaman içindeki eğilimi değerlendirmek için Konum-Zaman Küpü'nün her bir parçasında, bulunduğu zaman dilimlerindeki eğilimler için bir z-skoru ve bir p-değeri olarak hesaplanır. Küçük p değerleri, eğilimin istatistiksel olarak anlamlı olduğu anlamına gelir. z-skoruna ilişkin işaret, analiz edilen değişkenin artış eğiliminde (pozitif z-puanı) veya düşüş eğiliminde (negatif z-puanı) olduğunu tanımlar (Bennett vd., 2020).



Şekil 3: Mann-Kendall istatistiği ile zaman içindeki değişimlerin küp üzerinde görselleştirilmesi

Eşitlik 2 ile hesaplanan Mann Kendal Trend İstatistiği'nde (S); sign sembolik bir işaret fonksiyonunu, R_i ve R_j sırasıyla x_i ve x_j gözlemlerinin/verilerinin zaman serisindeki sıralamalarını, Z_S standart z-skorumu ve $D(S)$ ise varyansı ifade etmektedir (Cressie & Wikle, 2015; Huang, 2021; Ogneva-Himmelberger & Haynes, 2022; Wu vd., 2022).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \quad (2)$$

$$a_{ij} = \text{sign}(x_j - x_i) = \text{sign}(R_j - R_i) = \begin{cases} 1, & x_i < x_j \\ 0, & x_i = x_j \\ -1, & x_i > x_j \end{cases} \quad (3)$$

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{D(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{D(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$D(S) = \frac{T(T-1)(2T+5)}{18} \quad (5)$$

2.4 Yükselen Sıcak-Konum Analizi

Yükselen Sıcak-Konum Analizi CBS tabanlı coğrafi kümeleme analizlerinin gelişmiş bir türüdür. Birçok zamansal bilgi içeren konum bazlı olayın zamansal eğilimleri/örüntüleri ve altında yatan faktörler etkin bir şekilde incelenebilir. Yükselen Sıcak-Konum Analizi trend analizine benzer şekilde Konum-Zaman Küplerini girdi olarak kullanmaktadır. Böylelikle Getis-Ord G_i^* ve Mann Kendall Trend İstatistiği'ni bütünlük olarak kullanmaktadır. Getis-Ord G_i^* indeks değeri ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{s \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \frac{1}{n-1} \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2}} \quad (6)$$

$$\bar{X} = \sum_{j=1}^n x_j \quad (7)$$

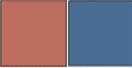
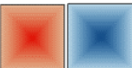
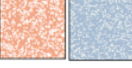
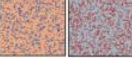
$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 - (\bar{X})^2} \quad (8)$$

Eşitlikte x_j Konum-Zaman Küpü içindeki i 'nci bölümün konum-zaman komşuluğu içindeki j 'nci bölümü için öznel

değerini, $w_{i,j}$, aralarındaki ters öklid mesafesiyle tanımlanan i 'nci ve j 'nci bölüm arasındaki konumsal ağırlıkları ve n ise Konum zaman Küpü içerisindeki toplam bölme sayısını ifade eder.

Getis-Ord G_i^* indeks değerinin konum-zaman perspektifinden uygulanmasıyla küpteki belli bir değişken değerlendirilir. Geleneksel Sıcak-Konum analizi, veri kümesinde üç güven düzeyiyle (%99, %95, %90) sıcak ve soğuk konum örüntü bilgisi sağlarken, gelişmiş Yükselen Sıcak-Konum Analizi sıcak ve soğuk konum örüntülerini sınıflandırır. Sınıflandırma sonucu hem sıcak hem soğuk konumlar için uygulanmakta olan toplam 17 tematik kategori oluşturulur. Oluşturulan her bir örüntü kategorisinin sembolojileri ve açıklamaları Tablo 1'de detaylı biçimde verilmiştir (Bennett vd., 2020; Cheng vd., 2020; Getis & Ord, 1992; Requía vd., 2017; Wu vd., 2022; Ye vd., 2018).

Tablo 1: Yükselen Sıcak-Konum Analizi örüntü kategorileri ve açıklamaları

Semboloji	Kategori	Açıklama
	Önemli Değişim Yok	Herhangi bir sıcak veya soğuk nokta örüntüsüne dâhil olmayan konumu ifade eder.
	Yeni Sıcak/ Soğuk Konum	Son zaman diliminde istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk nokta olan ve daha önce hiç istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk nokta olmayan bir konumu ifade eder.
	Ardışık Sıcak/ Soğuk Konum	Daha önceleri istatistiksel olarak anlamlı değilken tüm zaman dilimlerinin %90'ından daha az olmak kaydıyla son zaman dilimlerinde kesintisiz anlamlı sıcak/soğuk konumu ifade eder.
	Yoğunlaşan Sıcak/ Soğuk Konum	Son zaman dilimi de dahil olmak üzere zaman dilimi aralıklarının %90'ı için istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk konumu ifade eder. Ayrıca yüksek/düşük değerlerin her zaman dilimindeki kümelenme yoğunluğu genel olarak artmaktadır ve bu artış istatistiksel olarak anlamlıdır.
	Sürekli Sıcak/ Soğuk Konum	Zaman dilimi aralıklarının %90'ı için istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk konum olan ve zaman içinde kümelenme yoğunluğunda fark edilebilir bir trend olmayan konumu ifade eder.
	Azalan Sıcak/ Soğuk Konum	Son zaman dilimi de dahil olmak üzere zaman dilimi aralıklarının %90'ı için istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk konumu ifade eder. Ayrıca yüksek/düşük değerlerin her zaman dilimindeki kümelenme yoğunluğu genel olarak azalmaktadır ve bu artış istatistiksel olarak anlamlıdır.
	Nadir Sıcak/ Soğuk Konum	Dönem dönem aralıklarla istatistiksel olarak anlamlı sıcak/soğuk konum olup diğer dönemlerde anlamsız olan ve tüm zaman dilimlerinin %90'ından daha az olmak kaydıyla istatistiksel olarak anlamlı sıcak/soğuk konumu ifade eder.
	Salınlımlı Sıcak/ Soğuk Konum	Önceki bir zaman diliminde istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk konum olma geçmişine sahip olan, son zaman dilimi için istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak/soğuk konumu ifade eder. Zaman dilimi aralıklarının %90'ından azı istatistiksel olarak anlamlı sıcak/soğuk konumlar olmuştur.
	Zamansal Sıcak/ Soğuk Konum	En yakın zaman dilimi sıcak/soğuk konum değildir. Ancak zaman dilimi aralıklarının en az %90'ında istatistiksel olarak anlamlı sıcak/soğuk konumları ifade eder.

2.5 Yerel Kümelenme ve Aykırılık Analizi

Yerel Kümelenme ve Aykırılık Analizi diğer konum-zaman temelli analizler gibi Konum-Zaman Küpü'nü girdi olarak kullanmaktadır. Anselin Local Moran's I istatistik yöntemini kullanarak konum-zaman bilgisi içeren veri setlerindeki istatistiksel olarak anlamlı olan zamansal kümelenme ve aykırılıkları değerlendirir. Verilerin komşularından hem konum hem de zaman açısından istatistiksel olarak farklılık sergileyen alanları tespit etmeyi sağlar (Anselin, 1995; Bennett vd. 2020; Cheng vd., 2020; Halimi vd., 2020; Kowe vd., 2020; Zhang vd., 2019). Bu amaçlar doğrultusunda bu analiz tekniğinde Local Moran's I istatistik değeri, z-skoru, p-değeri ve kümelenme ve aykırılık tipini ifade eden bir sayısal değer hesaplanır. Local Moran's I indeks değeri ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Zhang vd., 2019):

$$I_i = \frac{(n-1)(x_i - \bar{X})}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{X})^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{X}) \quad (9)$$

Eşitlikte I_i Local Moran's I indeks değerini, x_i i 'nci kutunun konum-zaman komşuluğu içindeki j 'nci kutu için öznitelik değerini, $w_{i,j}$ i 'nci ve j 'nci kutular arasındaki konumsal ağırlıkları, n ise konum zaman küpü içerisindeki toplam kutu sayısını, $\bar{X}$ konum zaman küpündeki i 'nci kutunun uzay-zamansal komşuluğundaki tüm kutulardaki ilgili değişken için ortalamasını ifade eder. z-skoru ise aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

$$z_{I_i} = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{D[I_i]}} \quad (10)$$

$$E[I_i] = - \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j}}{n-1} \quad (11)$$

$$D[I_i] = E[I_i^2] - E[I_i]^2 \quad (12)$$

Eşitlikte z_{I_i} z-skoru istatistik değerini, $E[I_i]$, I_i için beklenen değeri ve $D[I_i]$ ise I_i 'nin varyansını ifade etmektedir.

Local Moran's I indeks değeri pozitif bir değere sahipse bu durum bir küp içerisindeki bir kutunun benzer yüksek veya düşük öznitelik değerlerinde sahip komşu kutulara sahip olduğu anlamına gelir ve bu kutu bir kümenin parçası olarak tanımlanır. Ancak negatif indeks değeri, bir kutunun farklı değerlere sahip komşu kutulara sahip olduğu anlamına gelir ve bu kutu aykırı olarak tanımlanır. Başka bir ifade ile $p=0.05$ istatistiksel anlamlılık derecesi için eğer $z_{I_i} > 1.96$ ise küpü oluşturan değişkenin değeri için küp içerisindeki bir kutunun değeri konum-zaman komşuluğundaki kutunun değerine benzer olup, Yüksek-Yüksek ya da Düşük-Düşük Kümelenme örüntüsü sergilemektedir. Eğer $z_{I_i} < -1.96$ ise istatistiksel anlamlılığa sahip konumsal aykırılıklar belirlenmektedir. Bu durumda Yüksek değere sahip kutular Düşük değere sahip komşu kutular ile çevrelendiğinde Yüksek-Düşük Aykırılık, Düşük değere sahip kutular Yüksek değere sahip komşu kutular ile çevrelendiğinde ise Düşük-Yüksek Aykırılık örüntüleri belirlenmektedir. $z_{I_i} = 0$ olması ise küpü oluşturan değişkenin rastgele bir dağılım gösterdiğini ifade etmektedir. Bu kapsamda CBS tabanlı Yerel Kümelenme ve Aykırılık Analizi 6 farklı kategoride sonuçlar üretir. 2 kategori Yüksek-Yüksek ve Düşük -Düşük değer kümelenmelerini, 2 kategori Yüksek-Düşük ve Düşük-Yüksek aykırılıklarını temsil eder. Diğer kategorilerden birisi zamansal-konumsal olarak anlamlı bir değişim olmadığını ifade ederken, diğeri ise zaman içerisinde bir konumun farklı tipler sergilediğini ifade eder. Oluşturulan her bir örüntü kategorisinin sembolizleri ve açıklamaları Tablo 2'de detaylı biçimde verilmiştir.

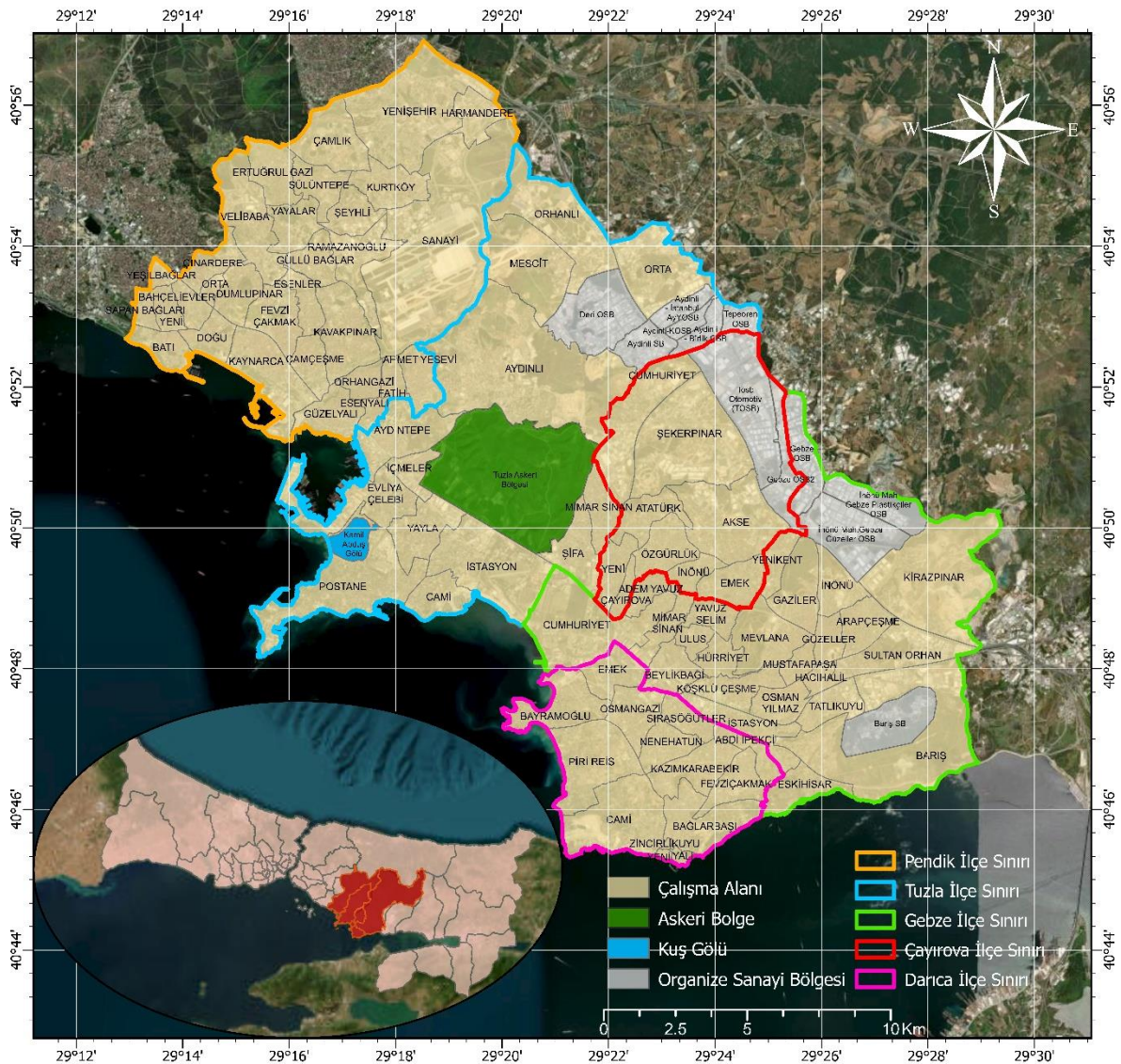
Tablo 2: Yerel Kümelenme ve Aykırılık Analizi örüntü kategorileri ve açıklamaları

Semboloji	Kategori	Açıklama
	Anlamlı Değil	Hiçbir zaman istatistiksel olarak anlamlı bir yerin olmadığı konumu ifade eder.
	Yüksek-Yüksek Kümelenme	Zaman içinde istatistiksel olarak anlamlı olan tek türün Yüksek-Yüksek Kümelenme örüntüsü sergilediği konumu ifade eder.
	Yüksek-Düşük Aykırılık	Zaman içinde istatistiksel olarak anlamlı olan tek türün Yüksek-Düşük Aykırılık örüntüsü sergilediği konumu ifade eder.
	Düşük-Yüksek Aykırılık	Zaman içinde istatistiksel olarak anlamlı olan tek türün Düşük-Yüksek Aykırılık örüntüsü sergilediği konumu ifade eder.
	Düşük-Düşük Kümelenme	Zaman içinde istatistiksel olarak anlamlı olan tek türün Düşük-Düşük Kümelenme örüntüsü sergilediği konumu ifade eder.
	Çoklu Tip	Zaman içinde istatistiksel olarak anlamlı birden çok küme türünün ve aykırı değer türlerini içeren konumu (örneğin bazı zamanlarda bir konum Yüksek-Düşük Aykırılık sergilerken ve bazı zaman dilimleri sırasında Düşük-Düşük Kümelenme örüntüsü sergilemiştir) ifade eder.

3. Uygulama

3.1 Çalışma Alanının Belirlenmesi ve Veri Setlerinin Elde Edilmesi

Çalışma alanı İstanbul'un doğusunda bulunan Pendik ve Tuzla ilçeleri ile Kocaeli'nin batısındaki Gebze, Darıca ve Çayırova ilçelerini kapsamakta olup, toplamda 116 mahalle içermektedir. 2023 yılı itibarıyla, Tuzla ilçesi 293 604, Pendik ilçesi 743 774, Kocaeli'nin en kalabalık ilçesi Gebze 407 436, Çayırova ilçesi 153 301 ve Darıca ilçesi ise 227 892 nüfusa sahiptir (URL-5). Çalışma alanı ilçeleri konut satışları açısından incelendiğinde ise 2023 yılında Pendik'te 10 654, Tuzla'da 7460, Gebze'de 5084, Darıca'da 2613 ve Çayırova'da 1256 konut satışı gerçekleşmiştir (URL-6). Nüfus artışına paralel olarak aktif konut piyasalarıyla öne çıkan bu ilçeler son zamanlarda kentsel dönüşüm hareketliliği ile de dikkat çekmektedir. Çalışma alanı ilçelerinde kentsel ve kırsal yerleşim alanları bulunmakta olup farklı arazi kullanımlarına sahiptirler. Ayrıca Gebze ilçesi ülkenin önemli organize sanayi bölgelerine sahip olup, sanayi ve teknoloji yatırımlarıyla önemli bir ekonomik merkez konumundadır. Bu durum, bölgedeki yerleşim alanları ve ekonomik faaliyetlerin çeşitlenmesini sağlamış, hem kentsel hem de ekonomik gelişim dinamiklerini güçlendirmiştir. Bu çalışma kapsamında doğrudan konut tipindeki taşınmazlara odaklanıldığından doğrudan kentsel yerleşim alanları çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda askeri bölge, kırsal kesimler ve sanayi mahalleleri hariç tutularak Pendik ilçesinden 31, Tuzla ilçesinden 13, Çayırova ilçesinden 9, Darıca ilçesinden 14 ve Gebze ilçesinden 23 olmak üzere toplamda 90 mahalle çalışma alanını oluşturmuştur (Şekil 4).



Şekil 4: Çalışma alanının belirlenmesi

Çalışma kapsamında konut tipindeki taşınmazların zaman-konuma bağlı değer değişim dinamiklerinin belirlenmesi amacıyla 2019 Ocak-2023 Aralık arası dönemi kapsayan çalışma alanı konut m² birim fiyatları Endeksa firmasından mahalle düzeyinde aylık olarak temin edilmiştir (URL-7). Temin edilen veriler mahallelere göre CBS ortamında düzenlenerek toplam 60 aydan oluşan 5400 kayıtlı bir veri seti hazırlanmıştır. Diğer taraftan değer değişimleri ile ekonomik değişkenler arasındaki ilişkileri analiz edebilmek için İnşaat Maliyet Endeksi, İnşaat Sektörü Güven Endeksi, kur değişimleri gibi Tablo 3’te detaylı biçimde açıklanan veriler 2019 Ocak-2023 Aralık arası dönemi kapsayacak şekilde temin edilerek analizler için hazır duruma getirilmiştir.

Tablo 3: Çalışma alanı için temin edilen veri setleri

Veri Seti	Düzey	Kaynak
Konut (m ²) Birim Fiyatları (F1)	Mahalle	Endeksa
İnşaat Maliyet Endeksi (F2)	Ülke	TÜİK- İnşaat ve Konut
İnşaat Sektörü Ekonomik Güven Endeksi (F3)	Ülke	TÜİK- Ekonomik Güven
Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) (F4)	Ülke	TÜİK- Enflasyon ve Fiyat
Yurt İçi Üretici Fiyat Endeksi (Yİ-ÜFE) (F5)	Ülke	TÜİK- Enflasyon ve Fiyat
İnşaat Sektörü Ücretli Çalışan Sayısı (F6)	Ülke	TÜİK- İstihdam, İşsizlik ve Ücret
Gayrisafi Yurt İçi Hasıla (F7)	Ülke	TÜİK- Ulusal Hesaplar
İktisadi Faaliyet Kollarına Göre Gayrisafi Yurt İçi Hasıla Değişim Oranları (Gayrimenkul) (F8)	Ülke	TÜİK- Ulusal Hesaplar
İktisadi Faaliyet Kollarına Göre Gayrisafi Yurt İçi Hasıla Değişim Oranları (İnşaat) (F9)	Ülke	TÜİK- Ulusal Hesaplar
Bankalarca Açılan Kredilere Uygulanan Ağırlıklı Ortalama Faiz Oranları (Konut) (F10)	Ülke	TCMB Elektronik Veri Dağıtım Sistemi- Faiz İstatistikleri
Piyasadaki Türk Lirası Verisi, M2, Para Arzı (F11)	Ülke	TCMB Elektronik Veri Dağıtım Sistemi
Bankacılık Sektörü Verileri-Tüketici Kredileri (Konut) (F12)	Ülke	Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurumu
Döviz Kurları (Dolar ve Euro) (F13)	Ülke	T.C Merkez Bankası Elektronik Veri Dağıtım Sistemi- Kurlar
Konut Satış İstatistikleri (F14)	İlçe	TÜİK-TKGM Konut Satış İstatistikleri
Yapı Kullanma İzin belgesi istatistikleri (Daire) (F15)	Ülke	TÜİK- İnşaat ve Konut

3.2 Taşınmaz Değer Değişimi ve Ekonomik Değişkenlerin İstatistiksel Analiz Teknikleri ile İncelenmesi

Zamansal ekonomik değişkenler ve taşınmaz değeri arasındaki ilişkinin istatistiksel analiz teknikleri ile incelenmesi taşınmazların değer değişim dinamiklerinin oluşmasında etkili olan faktörlerin anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda Tablo 3’te ifade edilen verileri temsil eden değişkenler kullanılarak değişkenlerin her birinin bir önceki aya göre yüzdesel değişimi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanarak model veri seti hazırlanmıştır.

$$\Delta F_i = \frac{F_{i(t_2)} - F_{i(t_1)}}{F_{i(t_1)}} \times 100 \quad (13)$$

Eşitlikte ΔF_i ilgili değişkenin $t_2 - t_1$ dönemi için yüzdesel değişimini, $F_{i(t_1)}$ ve $F_{i(t_2)}$ ise ilgili değişkenin sırasıyla t_1 ve t_2 zaman dilimlerindeki değerini ifade etmektedir.

Yüzdesel değişimler kullanılarak hazırlanan veri seti ile bir ÇDR modeli oluşturulmuştur. Modelde konut m² birim fiyatlarındaki değişim bağımlı değişken, diğer değişkenlerdeki değişim ise bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır. Model IBM SPSS Statistics 20 yazılım ortamında oluşturularak performansı değerlendirilmiştir. Modele ilişkin kriter katsayıları ve anlamlılık düzeyleri Tablo 4’te, modelleme performansı ise Tablo 5’te verilmiştir. Modelleme sonuçları yaygın

biçimde kullanılan R^2 değeri üzerinden ele alındığında, modelin bağımsız değişkenlerinin, bağımlı değişkenin varyansının %63.3'ünü açıklamakta olup, bu durum modelin oldukça iyi bir açıklayıcılığa sahip olduğunu ifade etmektedir. Başka bir ifade ile oluşturulan model, konut birim fiyatlarındaki değişim ve ekonomik değişkenlerdeki zamansal değişim arasında güçlü bir ilişki sunmakta olup ve konut m² birim fiyatlarını etkileyen faktörlerin önemli bir kısmını açıklamaktadır.

Tablo 4: Model kriter katsayıları ve istatistiksel anlamlılık düzeyleri

Model	Standardize Edilmemiş Katsayılar		Standardize Katsayılar	t	Anlamlılık Seviyesi	B için Güven Aralığı (%95)		Çoklu Doğrusallık İstatistikleri	
	B	Std. Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Tolerans	VEF
(Sabit)	-1.411	0.852		-1.655	0.105	-3.127	0.306		
F2	-0.210	0.215	-0.187	-0.977	0.334	-0.643	0.223	0.222	4.505
F3	0.001	0.057	0.002	0.013	0.990	-0.115	0.116	0.601	1.664
F4	0.530	0.313	0.325	1.692	0.098*	-0.101	1.161	0.220	4.541
F5	0.726	0.262	0.575	2.770	0.008***	0.198	1.254	0.189	5.282
F6	-0.069	0.135	-0.068	-0.510	0.612	-0.340	0.203	0.463	2.159
F7	-0.326	0.199	-0.300	-1.638	0.108	-0.728	0.075	0.243	4.118
F8	2.972	1.325	0.441	2.243	0.030**	0.303	5.641	0.211	4.742
F9	0.213	0.156	0.216	1.365	0.179	-0.101	0.528	0.326	3.064
F10	0.061	0.049	0.155	1.229	0.226	-0.039	0.160	0.515	1.940
F11	0.551	0.159	0.416	3.459	0.001***	0.230	0.871	0.563	1.776
F12	0.400	0.204	0.225	1.959	0.056*	-0.011	0.811	0.620	1.613
F13	-0.328	0.120	-0.392	-2.738	0.009***	-0.570	-0.087	0.397	2.520
F14	0.003	0.011	0.039	0.297	0.768	-0.019	0.026	0.469	2.133
F15	-0.139	0.090	-0.289	-1.550	0.128	-0.320	0.042	0.234	4.272

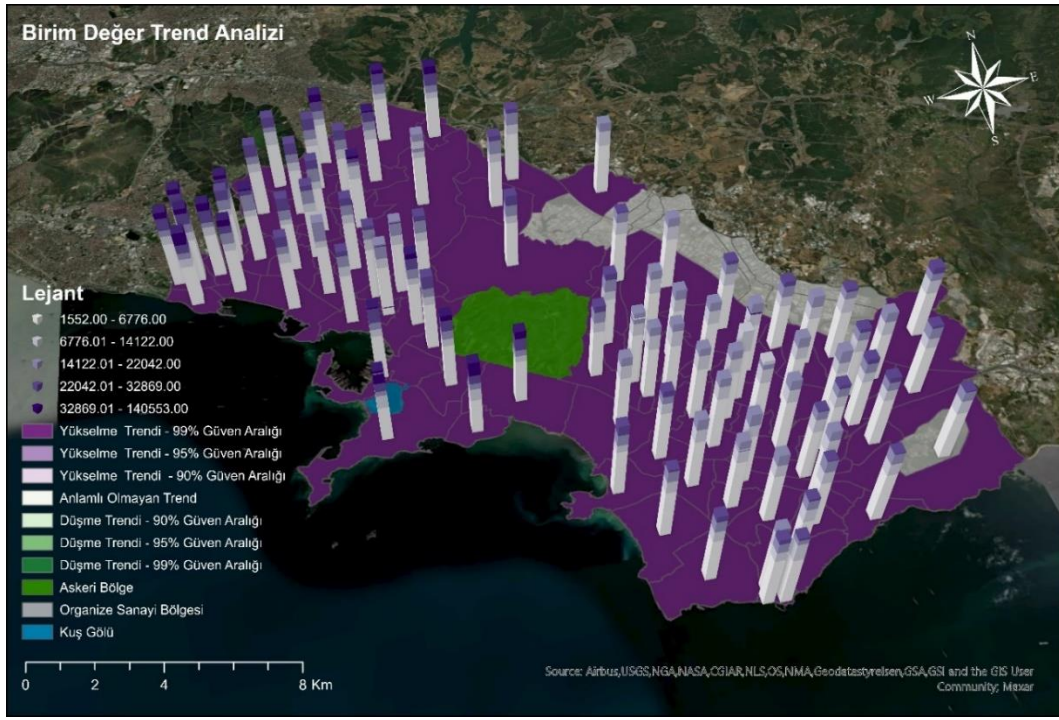
***: $p < 0.01$, **: $p < 0.05$, *: $p < 0.1$, VEF: Varyans Enflasyon Faktörü

Tablo 5: Modelleme performans sonuçları

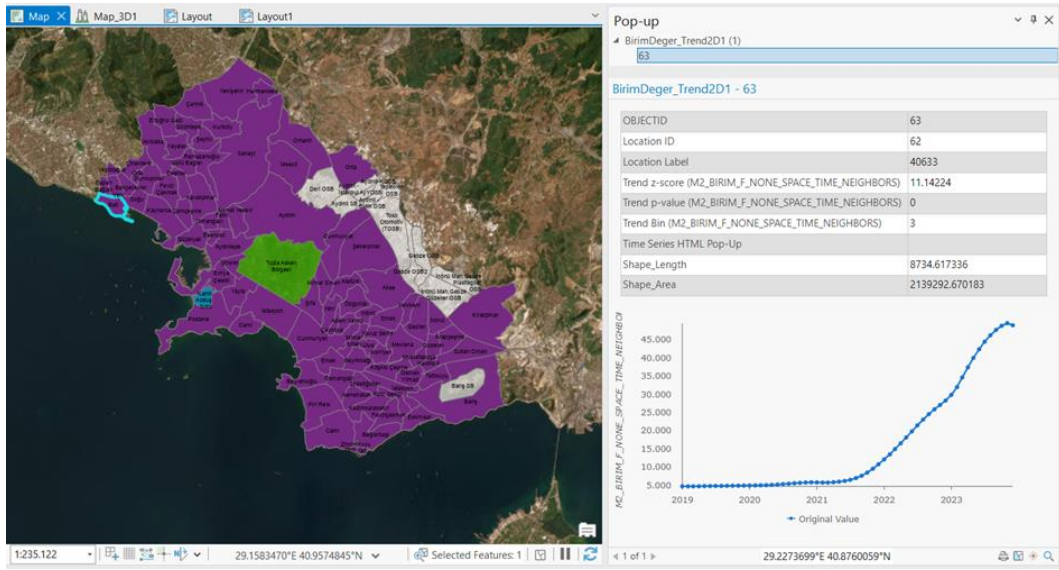
R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahmin Standart Hatası	Durbin-Watson
0.796	0.633	0.519	3.0849703	2.020

Modelleme sonuçları Tablo 4 üzerinden irdelendiğinde; Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) Değişimi (F4), Yurt İçi Üretici Fiyat Endeksi (Yİ-ÜFE) Değişimi (F5), İktisadi Faaliyet Kollarına Göre Gayrisafı Yurt İçi Hasıla Değişim Oranları (Gayrimenkul) (F8), Bankalarca Açılan Kredilere Uygulanan Ağırlıklı Ortalama Faiz Oranları (Konut) Değişimi (F10), Piyasadaki Türk Lirası Para Arzı Değişimi (F11), Bankacılık Sektörü Verileri-Tüketici Kredileri (Konut) Değişimi (F12) ve Döviz Kurları (Dolar ve Euro) Değişimi (F13) değişkenlerinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan gayrimenkul sektörünün büyüklüğünü temsil eden GSYH, İktisadi Faaliyet Kollarına Göre Değişim Oranları (Gayrimenkul) (F8)'deki değişim konut birim fiyatlarını etkileyen en önemli faktör olup, bu değişimdeki %1'lik bir artış, konut birim fiyatlarındaki değişimi %2.972 oranında artırmaktadır. Yİ-ÜFE Değişimi (F5) ise konut birim fiyatlarındaki değişimi %0.726 oranında artırmakta, bu da üretici fiyatlarındaki artışların konut piyasasına nasıl yansıdığını ortaya koymaktadır. Üçüncü önemli değişken olarak Piyasadaki Türk Lirası Para Arzı Değişimi (F11) öne çıkmakta olup, burada birim artış, konut birim fiyatlarındaki değişimi %0.551 oranında yükseltmektedir. Para arzındaki artışın konut talebini artırdığı ve birim fiyatların yükselmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. TÜFE Değişimi (F4) ise konut birim fiyatlarındaki değişim üzerinde %0.530 oranında bir etki oluşturmakta; bu da genel enflasyonun konut piyasası üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Bankacılık Sektörü Verileri-Tüketici Kredileri (Konut) Değişimi (F12) ise konut birim fiyatlarındaki değişim üzerinde %0.400 oranında bir pozitif etki göstermektedir. Tüketici kredilerindeki artışın konut birim fiyatlarındaki artışı da etkileyebileceğini

Jeo. Jeolnf. Derg., 2025, 12(1):58-76



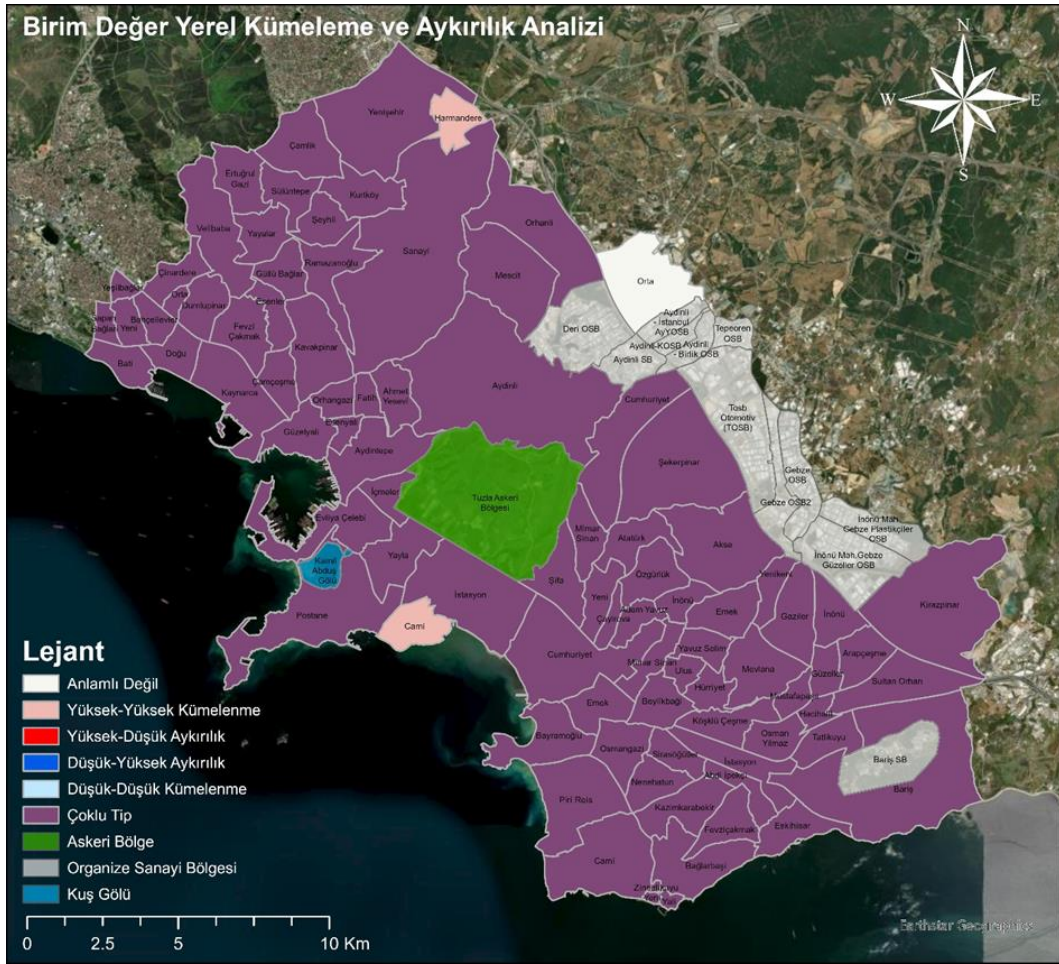
Şekil 6: Birim değer Konum-Zaman Küpü ile trend analizi



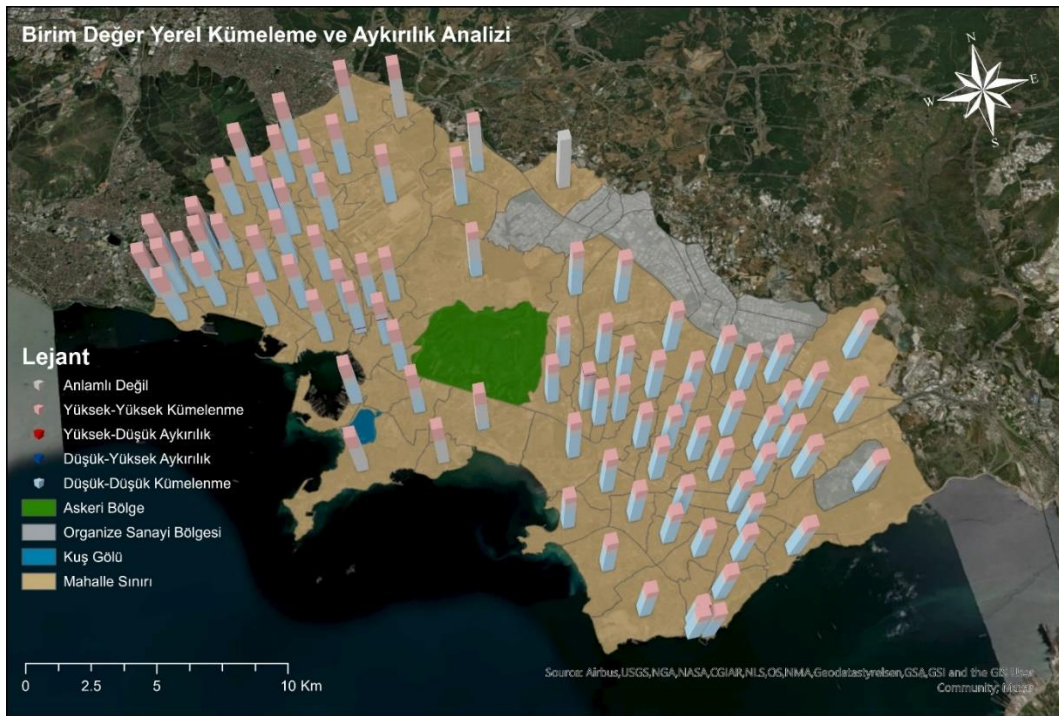
Şekil 7: Mahalle bazlı zamansal birim değer trend grafiklerinin oluşturulması

3.4.2 Yükselen Sıcak-Konum Analizi

Oluşturulan Konum-Zaman Küpü kullanılarak diğer bir konumsal-zamansal analiz olan Yükselen Sıcak-Konum Analizi gerçekleştirilmiştir (URL-8). Şekil 8'deki analiz sonuçları irdelendiğinde çalışma alanında Ardışık Sıcak Konum ve Salımlı Sıcak Konum kategorilerinde zamansal örüntüler tespit edilmiştir. Bu bağlamda Tuzla ilçesinin güneyinde Postane, Cami ve İstasyon mahalleleri ile kuzeyinde Orhanlı ve Orta mahalleleri; Pendik ilçesinin kuzeyindeki Yenişehir ve Harmandere mahalleleri Ardışık Sıcak Konum kategorisine dâhil olmuştur. Çalışma alanındaki tüm diğer mahallelerin ise Salımlı Sıcak Konum kategorisine dâhil olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9: Birim değer Konum-Zaman Küpü ile Yerel Kümeleme ve Aykırılık Analizi



Şekil 10: Birim değer Konum-Zaman Küpü ile Yerel Kümeleme ve Aykırılık Analizi 3B görselleştirme

4. Sonuç ve Öneriler

Taşınmazlar ülke ekonomilerinin temel yapı unsurlarından birisi olup, ekonominin pek çok alanında kritik bir rol oynar. Taşınmaz sektörü doğrudan ve dolaylı olarak birçok sektörü etkileyerek, ekonomik döngünün oluşmasına katkı sağlamaktadır. Taşınmazların yatırım aracı olarak ve bankacılık faaliyetlerinde sigorta olarak kullanılması değer değişim dinamiklerinin analiz edilmesinin önemine işaret etmektedir. Bu bağlamda taşınmazların konum ve zamana bağlı olarak değer değişim dinamiklerinin modellenmesi, taşınmaz piyasasında stratejik kararlar almak için büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte, taşınmazların değer değişimini etkileyen zamana bağlı ekonomik unsurların istatistiksel tekniklerle modellenerek piyasa dinamiklerinin anlaşılması, yatırımcılara ve politika yapıcılara taşınmazlar için önemli altlıklar teşkil eder. Taşınmazların değer değişim dinamiklerinin konum ve zamana göre analiz edilmesi, ekonomik risklerin optimize edilmesi ve taşınmaz geliştirme faaliyetlerinin en etkin ve verimli biçimde değerlendirilmesine yönelik önemli avantajlar sağlar.

Bu çalışma kapsamında konut tipindeki taşınmazların zamansal değer değişim dinamiklerinin belirlenebilmesi için İstanbul'un Pendik ve Tuzla ilçeleri ile Kocaeli ilinin Gebze, Çayirova ve Darıca ilçelerindeki mahallerde 2019 Ocak-2023 Aralık döneminde pilot uygulama gerçekleştirilmiştir. 14 ekonomik değişkenle oluşturulan modelde Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) Değişimi, Yurt İçi Üretici Fiyat Endeksi (Yİ-ÜFE) Değişimi, İktisadi Faaliyet Kollarına Göre Gayrisafi Yurt İçi Hasıla Değişim Oranları (Gayrimenkul), Bankalarca Açılan Kredilere Uygulanan Ağırlıklı Ortalama Faiz Oranları (Konut) Değişimi, Piyasadaki Türk Lirası Para Arzı Değişimi, Bankacılık Sektörü Verileri-Tüketici Kredileri (Konut) Değişimi ve Döviz Kurları (Dolar ve Euro) Değişimi değişkenlerinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan taşınmazların konum-zamansal değer değişim dinamiklerinin belirlenebilmesi için oluşturulan Konum-Zaman Küp modeli ile CBS tabanlı analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen Konumsal-Zamansal Trend Analizi ile tüm mahallelerin %99 güven aralığında yükselme trendi gösterdiği tespit edilirken, Yükselen Sıcak-Konum Analizi ile Ardışık Sıcak Konum ve Salınlı Sıcak Konum kategorilerinde zamansal örüntüler tespit edilmiştir. Böylelikle taşınmazların konumsal-zamansal değer değişim dinamiklerinin CBS ve istatistiksel analiz teknikleri ile etkin biçimde belirlenebileceği sonuçlarla desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma ekonomik değişkenler ve değer değişimi arasındaki ilişkilerin ÇDR gibi istatistiksel modeller yardımıyla önemli ölçüde açıklanabilmesinin yanı sıra konumsal-zamansal değer değişimlerinin CBS ortamında konumsal-zamansal analiz teknikleri ile değerlendirilmesi literatüre bütünlük bir metodoloji sunmaktadır. Önerilen hibrit yaklaşım ile kentsel alanlarda taşınmazların konumsal-zamansal değer değişim dinamiklerinin belirlenmesi, taşınmaz sektöründe doğru stratejiler geliştirmek ve yatırım kararlarını optimize etmek için kullanılabilir.

Taşınmaz değer değişiminde etkili faktörlerin hem zamansal hem konumsal analizi, yerelle ve taşınmazlarla ilişkili ulusal ekonominin faaliyetlerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi, sosyal refahın artırılması ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile uyumlu olarak sürdürülebilir şehir ve toplulukların oluşmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca gelecek çalışmalarda taşınmaz değerinin Konum-Zaman Küp modeli zaman serisi teknikleri ile kullanılarak belirli bir bölgedeki taşınmaz değerlerinin yıllık, mevsimlik veya aylık değişimleri analiz edilebilir. Kentsel ve kırsal farklı coğrafi alanlarda, değer dalgalanmalarının nasıl olduğu ilgili yerleşim yerinde zamana bağlı olarak izlenebilir. Bir bölgedeki taşınmaz değerlerinin zaman içindeki gelişimi incelenerek yatırım potansiyeli taşıyan yerler tespit edilebilir. Taşınmaz geliştirme projelerine bağlı olarak, hangi bölgelerde değer artışlarının ivme kazandığı ve hangi bölgelerde ise azalma olduğu belirlenebilir. Bu kapsamda, kentsel dönüşüm, yeni ulaşım projeleri veya imar planlarının gayrimenkul değerleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılabilir. Konum-Zaman Küpü, deprem gibi doğal afetlerin, ekonomik krizler ve salgınların taşınmaz değerleri üzerindeki etkilerini ve ilgili konumlarda nasıl farklılık gösterdiğini incelemek için kullanılabilir. Ayrıca bu modelleri kullanarak, bir bölgede yaşanan ekonomik büyüme veya küçülme gibi sosyoekonomik faktörlerin taşınmaz değerleri üzerindeki uzun vadeli etkilerini izlemek mümkün olabilir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 122R021 no'lu 1001 projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan taşınmaz değer verilerinin sağlanmasında Endeksa firmasına katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Yazar Katkısı

Süleyman Şişman: Yazım, Veri Analizi. **Nilay Tellioglu:** Literatür Taraması, Veri Toplama, Yazım, Veri Analizi. **Arif Çağdaş Aydınoglu:** Fikir, Kavramsallaştırma, Metodoloji.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Akça, T. (2023). House price dynamics and relations with the macroeconomic indicators in Turkey. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, 16(4), 812-827.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- Arslan, İ. (2007). *Konut ekonomisi*. Sakarya: Sakarya Yayıncılık.
- Bennett, L., Vale, F., Nieto, A. (2020). Spatial Data Mining: Cluster Analysis and Space-Time Analysis. *2020 ESRI Federal GIS Conference*, <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/events/conferences/2020/federal-gis/means-and-medians-to-machine-learning-spatial-statistics-basics-and-innovations.pdf>
- Cheng, S., Zhang, B., Peng, P., Yang, Z., & Lu, F. (2020). Spatiotemporal evolution pattern detection for heavy-duty diesel truck emissions using trajectory mining: A case study of Tianjin, China. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118654.
- Cressie, N., & Wike, C. K. (2015) *Statistics for spatio-temporal data*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Cunha, A. M., & Lobão, J. (2021). The determinants of real estate prices in a European context: a four-level analysis. *Journal of European Real Estate Research*, 14(3), 331-348.
- Çetin, A.C. (2021). Türkiye’de konut fiyatlarına etki eden faktörlerin analizi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 5(1), 1-30.
- Erdoğan, S., & Memduhoğlu, A. (2019). A spatiotemporal exploratory analysis of real estate sales in Turkey using GIS. *Journal of European Real Estate Research*, 12(2), 207-226.
- Erkek, M., Çayırılı, K., & Hepsen, A. (2020). Predicting house prices in Turkey by using machine learning algorithms. *Journal of Statistical and Econometric Methods*, 9(4), 31-38.
- Ertürk, H., & Sam, N. (2016). *Kent ekonomisi*. Ekin Yayınevi.
- Gebeşoğlu, P. F. (2019). Housing price index dynamics in Turkey. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 14, 100-107.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 24(3), 189-206.
- Hägerstrand, T. (1970). What about people in regional science?. *Ninth European Congress of the Regional Science Association*, 24, 7-21.
- Halimi, L., Bagheri, N., Hoseini, B., Hashtarkhani, S., Goshayeshi, L., & Kiani, B. (2020). Spatial analysis of colorectal cancer incidence in Hamadan Province, Iran: a retrospective cross-sectional study. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 13, 293-303.
- Huang, Z. (2021). Spatiotemporal evolution patterns of the COVID-19 pandemic using space-time aggregation and spatial statistics: a global perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 519.
- İslamoğlu, B., & Nazlıoğlu, Ş. (2019). Enflasyon ve konut fiyatları: İstanbul, Ankara ve İzmir için panel veri analizi. *Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 93-99.

- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., & Taylor, J. (2023). *Linear regression*. James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., & Taylor, J. (Ed). *An introduction to statistical learning: With applications in python*. 69-134. Springer Cham.
- Karadaş, H. A., & Salihoğlu, E. (2020). Seçili makroekonomik değişkenlerin konut fiyatlarına etkisi: Türkiye örneği. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 16(1), 63-80.
- Kiel, K. A., & Zabel, J. E. (2008). Location, location, location: The 3L Approach to house price determination. *Journal of Housing Economics*, 17(2), 175-190.
- Kitapci, O., Tosun, Ö., Tuna, M. F., & Turk, T. (2017). The use of artificial neural networks (Ann) in forecasting housing prices in Ankara, Turkey. *Journal of Marketing and Consumer Behaviour in Emerging Markets*, 1(5), 4-14.
- Kowe, P., Mutanga, O., Odindi, J., & Dube, T. (2020). A quantitative framework for analysing long term spatial clustering and vegetation fragmentation in an urban landscape using multi-temporal landsat data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102057.
- Kveladze, I., Kraak, M. J., & van Elzakker, C. P. (2019). Cartographic design and the space-time cube. *The Cartographic Journal*, 56(1), 73-90.
- Mo, C., Tan, D., Mai, T., Bei, C., Qin, J., Pang, W., & Zhang, Z. (2020). An analysis of spatiotemporal pattern for COIVD-19 in China based on space-time cube. *Journal of Medical Virology*, 92(9), 1587-1595.
- Ogneva-Himmelberger, Y., & Haynes, M. (2022). Using space-time cube to analyze trends in adverse birth outcomes and maternal characteristics in Massachusetts, USA. *GeoJournal*, 87(4), 2491-2504.
- Ören, K., & Yüksel, H. (2013). Türkiye’de konut sorunu ve temel dinamikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18, 47-84.
- Rabiei-Dastjerdi, H., & McArdle, G. (2021). Novel exploratory spatiotemporal analysis to identify sociospatial patterns at small areas using property transaction data in Dublin. *Land*, 10(6), 566.
- Requia, W. J., Roig, H. L., Koutrakis, P., & Adams, M. D. (2017). Modeling spatial patterns of traffic emissions across 5570 municipal districts in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 148, 845-853.
- Türk, T., Tunab, M. F., & Kitapci, O. (2017). Estimating the residence price by linear regression model and Geographical Information Systems (GIS). *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, 4, 208-218.
- Wu, P., Meng, X., & Song, L. (2022). Identification and spatiotemporal evolution analysis of high-risk crash spots in urban roads at the microzone-level: Using the space-time cube method. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14(9), 1510-1530.
- Yalpir, Ş. (2018). Enhancement of parcel valuation with adaptive artificial neural network modeling. *Artificial intelligence review*, 49, 393-405.
- Ye, W. F., Ma, Z. Y., & Ha, X. Z. (2018). Spatial-temporal patterns of PM_{2.5} concentrations for 338 Chinese cities. *Science of The Total Environment*, 631, 524-533.
- Zandi, G., Mahadevan, A., Supramaniam, L., Aslam, A., & Theng, L. K. (2015). The economical factors affecting residential property price: The case of Penang island. *International Journal of Economics and Finance*, 7(12).
- Zhang, Z., Ming, Y., & Song, G. (2019). Identify road clusters with high-frequency crashes using spatial data mining approach. *Applied Sciences*, 9(24), 5282.
- Zhang, Y., Liu, X., Liu, M., Zou, X., Zhang, Q., & Peng, T. (2021). Multi-Scale Spatiotemporal Change Characteristics Analysis of High-Frequency Disturbance Forest Ecosystem Based on Improved Spatiotemporal Cube Model. *Remote Sensing*, 13(13), 2537.
- URL-1: Türkiye Hanehalkı Finansal Algı ve Tutum Araştırması (2020). <https://www.cbfo.gov.tr/turkiye-hanehalkifinansal-algi-ve-tutum-arastirmasi> (Erişim Tarihi: 15 Ocak 2020).
- URL-2: TÜİK-İnşaat Maliyet Endeksi (2024). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Construction-Cost-Index-July-2024-53666> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).
- URL-3: TÜİK-Tüketici Fiyat Endeksi (2024). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Haziran-2024-53616> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).
- URL-4: TCMB-Bankalarca Açılan Kredilere Uygulanan Ağırlıklı Ortalama Faiz Oranları (2024). <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Faiz+Istatistikleri/Bankalarca+Acilan+Kredi/> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).
- URL-5: TÜİK-Nüfus ve Demografi İstatistikleri (2024). <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109> (Erişim

Tarihi: 30 Ekim 2024).

URL-6: TÜİK-Konut Satış İstatistikleri (2024). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Konut-Satis-Istatistikleri-Haziran-2024-53760> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).

URL-7: Endeksa (2024). <https://www.endeksa.com/tr/analiz/turkiye/endeks/satilik/konut> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).

URL-8: Emerging Hot Spot Analysis-Space Time Pattern Mining (2024). <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/emerginghotspots.htm> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).

URL-9: Local Outlier Analysis -Space Time Pattern Mining (2024). <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/localoutlieranalysis.htm> (Erişim Tarihi: 30 Ekim 2024).

Investigation of the effect of GCP number and distribution on photogrammetric product accuracy in UAV photogrammetry

Tarik Turk^{1*} , Berkay Bahadır² , Yasin Demirel^{1,3} , Cemali Altuntas⁴ , Taylan Ocalan⁴ 

¹Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Sivas, Türkiye.

²Hacettepe University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Cankaya, Ankara, Türkiye.

³Bartın University, Department of Information Technology, Bartın, Türkiye.

⁴Yildiz Technical University, Campus of Davutpaşa, Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatic Engineering, Esenler, Istanbul, Türkiye.

Abstract: Recently, photogrammetric products produced using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are frequently preferred for disaster management, geological, and meteorological studies, urban studies and military purposes. Obtaining products with UAV photogrammetry provides a significant advantage over ground-based methods in terms of speed and cost. At the same time, the accuracy of the products produced is of particular importance. In this study, the effects of the number of Ground Control Points (GCPs) and GCP network design on accuracy were investigated. In this direction, 12 GCPs with homogeneous distribution in the study area were established and their locations were determined by GNSS measurements. Then, scenarios with different number of GCPs and different network designs were created, and the accuracy of these points were evaluated. As a result, it has been concluded that 5 GCPs homogeneously distributed in the field is sufficient for the products at high accuracy (≤ 10 cm) required in geomatics applications, increasing the number of the GCPs will not benefit the accuracy of the project and this process is disadvantageous in terms of increasing the cost along with the speed.

Keywords: UAV Photogrammetry, GCP, Network design

İHA fotogrametrisinde YKN sayısı ve dağılımının fotogrametrik ürün doğruluğuna etkisinin araştırılması

Öz: Son zamanlarda İnsansız Hava Araçları (İHA) kullanılarak üretilen fotogrametrik ürünler afet yönetimi, jeolojik ve meteorolojik araştırmalar, şehircilik çalışmaları ve askeri amaçlar için sıklıkla tercih edilmektedir. İHA fotogrametrisi ile ürün elde etmek hız ve maliyet açısından yersel yöntemlere göre önemli bir avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda üretilen ürünlerin doğruluğu da ayrı bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Yer Kontrol Noktası (YKN) sayısının ve YKN ağ tasarımının doğruluk üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda çalışma alanında homojen dağılım gösteren 12 nokta tesis edilerek GNSS ölçümleri ile konumları belirlenmiştir. Ardından, farklı YKN sayısına ve farklı ağ tasarımına sahip senaryolar oluşturularak bu noktaların doğrulukları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, arazide homojen dağılım gösteren 5 YKN'nin geomatik uygulamalarında gereksinim duyulan yüksek doğruluklu (≤ 10 cm) ürünler için yeterli olduğu, YKN sayısını artırmanın projenin doğruluğuna fayda sağlamayacağı ve bu işlemin hız ile birlikte maliyeti artırması bakımından dezavantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler: İHA fotogrametrisi, YKN, Ağ tasarımı

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 346 487 2438

Geliş Tarihi/Received: 05.02.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 03.03.2025



0000-0002-2671-7590, turk@cumhuriyet.edu.tr (Turk T.)*
0000-0003-3169-8862, berkaybahadur@hacettepe.edu.tr (Bahadır B.)
0000-0002-5582-984X, ysdmrl58@gmail.com (Demirel Y.)
0000-0002-9660-6124, cemali@yildiz.edu.tr (Altuntas C.)
0000-0003-0861-013X, tocalan@yildiz.edu.tr (Ocalan T.)

1. Introduction

High-resolution products such as orthoimagery, point clouds and Digital Surface Models (DSM) derived from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry are of increasing importance for many different engineering fields that require a complete understanding of topography. These products are produced for a wide variety of purposes and can be produced by many different vehicles such as satellites, airplanes and UAVs. UAVs are emerging as a viable alternative to conventional airborne and satellite sensors due to their lower cost, high temporal and spatial resolution, and flexibility in image acquisition (Harwin & Lucieer, 2012; Hugenholtz et al., 2013; Ozdas et al., 2024; Westoby et al., 2012). In recent years, UAVs can be used effectively and efficiently in many areas such as military purposes, detection and management of natural disasters such as forest fires, earthquakes and landslides, meteorological and geological studies, archaeological field applications, photogrammetric earth modeling and mapping (Mozas-Calvache et al., 2012; Niethammer et al., 2012; Okuyama et al., 2005; Ollero & Merino, 2006; Xiang & Tian, 2011). The use of UAVs in photogrammetric projects has many advantages such as being less affected by meteorological conditions, easy access to inaccessible and risky areas, high location accuracy and fast data processing, and ease of flight. On the other hand, some aspects such as increased wind speed, dust clouds, rainy weather, which affect image quality, and limited time in the air due to battery limitations can be considered as negative (Gencer, 2016; Hastaoglu et al., 2023).

Ground Control Points (GCPs) are generally used to produce very high accuracy (≤ 5 cm) photogrammetric products, especially in geomatics discipline. On the other hand, in the case of using GNSS-equipped UAVs that allow RTK (Real Time Kinematic) and/or PPK (Post Processing Kinematic) solutions, photogrammetric products with an accuracy (≤ 15 cm) that can be easily used by many different disciplines depending on the Ground Sample Distance (GSD) can be produced.

In the literature, various studies have examined the effect of the distribution and number of GCPs on the positional accuracy of maps produced from UAV-collected data. Indirect georeferencing requires a sufficient number of GCPs with a homogeneous distribution if GCPs are established, measured, and used. However, methods such as Real Time Kinematic (RTK) and Post Processing Kinematic (PPK) in UAV photogrammetry can reduce or even eliminate the use of GCPs depending on the desired accuracy in the project (Ferrer-González et al., 2020; Turk & Ocalan, 2020; Turk et al., 2022). Therefore, if measurements are made with methods such as RTK or PPK, it is very important to investigate the number of GCPs required in the field and their appropriate distribution, since the number of GCPs directly affects labor, time, and cost. There are several studies on this subject in the literature.

Agüera-Vega et al. (2017a) conducted a study on the effect of the number of GCPs on the accuracy of DSM and orthoimagery produced by UAV/RTK method. In this study, 160 images were acquired from a height of 120 meters in an area of 17.64 hectares and the effect of different GCP numbers (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, and 20) on the accuracy was analyzed with the help of Root Mean Square Error (RMSE) values. With 15 and 20 GCPs, RMSE_{xy} and standard deviation values for horizontal accuracy were 4.6 ± 0.340 cm and 4.5 ± 0.169 cm, respectively, while RMSE_z and standard deviation values for vertical accuracy were 5.8 ± 1.21 cm and 4.7 ± 0.86 cm, respectively. As a result, it was concluded that similar results were obtained in both scenarios, however the most suitable option in terms of factors such as time and cost was 15 GCPs. In general, a decreasing trend was observed in the RMSE values as the number of GCPs increased. However, it was emphasized that there was not a big difference between 15 and 20 GCPs, so 15 GCPs were more preferable.

Martínez-Carricondo et al. (2018) investigated the effects of different GCP distributions on horizontal and vertical accuracies. It was found that the edge distribution and stratified distribution gave the best results. It was found that GCPs should be

placed at the edge of the study area to optimize horizontal accuracy; however, this method is not sufficient for vertical accuracy. To improve vertical accuracy, it was suggested to place GCPs in a stratified distribution within the study area at a density of approximately 1.7 GCP/ha. The combination of these two methods was found to be the most appropriate strategy to minimize the total error. In the study, the best horizontal accuracy of 0.035 m was obtained by placing GCPs in an edge distribution and spaced 84 m apart. However, the vertical accuracy increased to 0.062 m in this scenario. On the other hand, the optimal combination for optimizing vertical accuracy was found to be a stratified distribution at a density of 1.7 GCP/ha, with a vertical accuracy of 0.047 m and a horizontal accuracy of 0.045 m. If the GCPs were spaced at 46.7 m intervals according to the edge distribution, the horizontal accuracy was 0.035 m and the vertical accuracy was 0.048 m. These results indicate that the distribution of GCPs should be carefully planned to improve photogrammetric accuracy.

[Tomaščík et al. \(2017\)](#) investigated the effect of different number and distribution of GCPs (4, 5, 7, and 9) installed on the ground on horizontal and vertical accuracies. As a result, they emphasized that the number of GCPs used does not have a significant effect on the accuracy. They stated that there was not a significant difference between using 4 and 9 similarly distributed GCPs in the field and that increasing the number of GCPs too much would negatively affect the effectiveness of the survey. Instead, they stated that the use of more precise methods of measuring and positioning of the GCPs would have a more positive effect on accuracy.

[Agüera-Vega et al. \(2017b\)](#) evaluated the effects of flight height, terrain morphology, and number of GCPs on accuracy. In the study, 60 different photogrammetric scenarios were carried out using five different terrain morphologies, four flight altitudes (50, 80, 100, and 120 m) and three different GCP numbers (3, 5, and 10). The results showed that the horizontal accuracy (RMSEX, RMSEY, RMSEXY) was not significantly affected by flight height or terrain morphology, but the number of GCPs had a significant impact on the accuracy. In terms of horizontal accuracy, the best results were obtained when using 5 or 10 GCPs, especially in flat areas. In terms of vertical accuracy, flight altitude and number of GCPs were found to be important factors, with accuracy decreasing as flight altitude increased. The highest accuracy was obtained with a flight altitude of 50 m and 10 GCPs, where RMSEX, RMSEY, RMSEXY, and RMSEZ values were calculated as 0.038, 0.035, 0.053, and 0.049 m, respectively.

[Sanz-Ablanedo et al. \(2018\)](#) examined the effects of the number and distribution of GCPs on accuracy in a square coal mine area of 1200 ha. As a result of the study, they stated that an increase in the number of GCPs improves accuracy and the importance of a balanced distribution of GCPs in the study area. In this context, they emphasized that the highest accuracy was achieved when the GCPs were evenly distributed over the entire area, and that if the density of GCPs was clustered in the center or edge regions, it gave insufficient results. They mentioned the necessity of using a large number of GCPs (minimum 3 GCPs per 100 images) to achieve high accuracy in large projects.

[Oniga et al. \(2020\)](#) examined the effect of the number of GCPs on accuracy with a low-cost UAV flight at a height of 28 m above ground in an area of 1 hectare. As a result, it was found that increasing the number of GCPs from 4 to 20 reduced the RMSE values by 50%.

[Ferrer-González et al. \(2020\)](#) investigated the effect of the number and distribution of the number of GCPs in the terrain on the accuracy of the photogrammetric product in a corridor-shaped study area with UAV photogrammetry. They emphasized that the horizontal and vertical accuracy improved with the increase in the number of GCPs used in the study and that horizontal accuracy was always better than vertical accuracy. They also stated that even if an RTK capable UAV was used, the use of GCPs was necessary in projects that required higher accuracy.

Deliry and Avdan (2024) emphasized that flight altitude does not affect the horizontal accuracy; however, the vertical accuracy decreases with increasing altitude, the vertical accuracy improves significantly with the increase in the number of GCPs used, and the vertical accuracy is not reliable in DSMs obtained without the use of GCPs.

Liu et al. (2022) evaluated the accuracy of the products obtained by direct georeferencing method. They emphasized that this accuracy improves with the use of GCPs, but this decrease is not significant above a density of 12 GCP/km². In general, they mentioned the positive effects of homogeneous distribution of the GCPs and the establishment of a GCP near the center of the area on the accuracy.

Hastaoglu et al. (2023) emphasized that distribution of GCPs is more important than number of GCPs to achieve the highest accuracy in UAV photogrammetry projects. They emphasized that although the homogeneous distribution of the GCPs that accurately reflects the geometric structure of the study area increases the accuracy, the results are negatively affected by poorly designed GCP networks or those placed only at the field boundaries. They also emphasized that in UAV photogrammetry, increasing the number of GCPs alone will not improve the position accuracy, and that an accurate GCP design that also takes into account the topographic and geometric structure is required.

As can be understood from the above studies, even if measurements are to be made with UAVs equipped with hardware that allows RTK/PPK solution, the installation of a GCP helps to increase the accuracy to higher levels. In addition, it can be difficult to collect photogrammetric data using a large number of GCPs due to time, cost, labor, and accessibility (Zhang et al., 2019). As another comparison, in RTK measurement, if the connection is lost even for a fraction of a second, there may be problems in producing accurate output products. However, the PPK measurement method does not have problem of losing signal connection. Therefore, PPK provides much more reliable results than RTK. In PPK, depending on the accuracy expected from the project, the use of GCP can be reduced or eliminated. As a matter of fact, recent studies have emphasized that high accuracy photogrammetric products can be produced below 10 cm without the need for GCP (Turk & Ocalan, 2020; Turk et al., 2022).

In this study, 12 GCPs were installed in the application area and necessary positioning measurements were made. Afterwards, a flight was performed with a UAV equipped with GNSS hardware capable of PPK solution. Then, the effects of the number of GCPs and their distribution on location accuracy were investigated in different scenarios.

2. Material and Methods

In this study, an area of approximately 6 km² within the campus of Sivas Cumhuriyet University with different vegetation, buildings, and topographical features was selected as the study area. In this area, 12 GCPs were installed, and their positions were determined via The Tersus Oscar GNSS receiver and CORS-TR. The receiver supports all GNSS satellite systems and frequencies, enabling high-precision position determination. It is capable of receiving GPS (L1 C/A, L2C, L2P, L5), GLONASS (L1 C/A, L2 C/A), BeiDou (B1, B2, B3, BDS-3), Galileo (E1, E5a, E5b), and QZSS (L1 C/A, L2C, L5) signals and is compatible with SBAS, WAAS, EGNOS, GAGAN, SDCM, and MSAS systems. With the 576-channel capacity, data were obtained from the CORS-TR station with the Network RTK method with a precision of 8mm+0.5ppm horizontally and 15mm+0.5ppm vertically.

In addition, a fixed GNSS reference station was installed approximately in the center of the study area for the solution of the kinematic GNSS data collected by UAV.

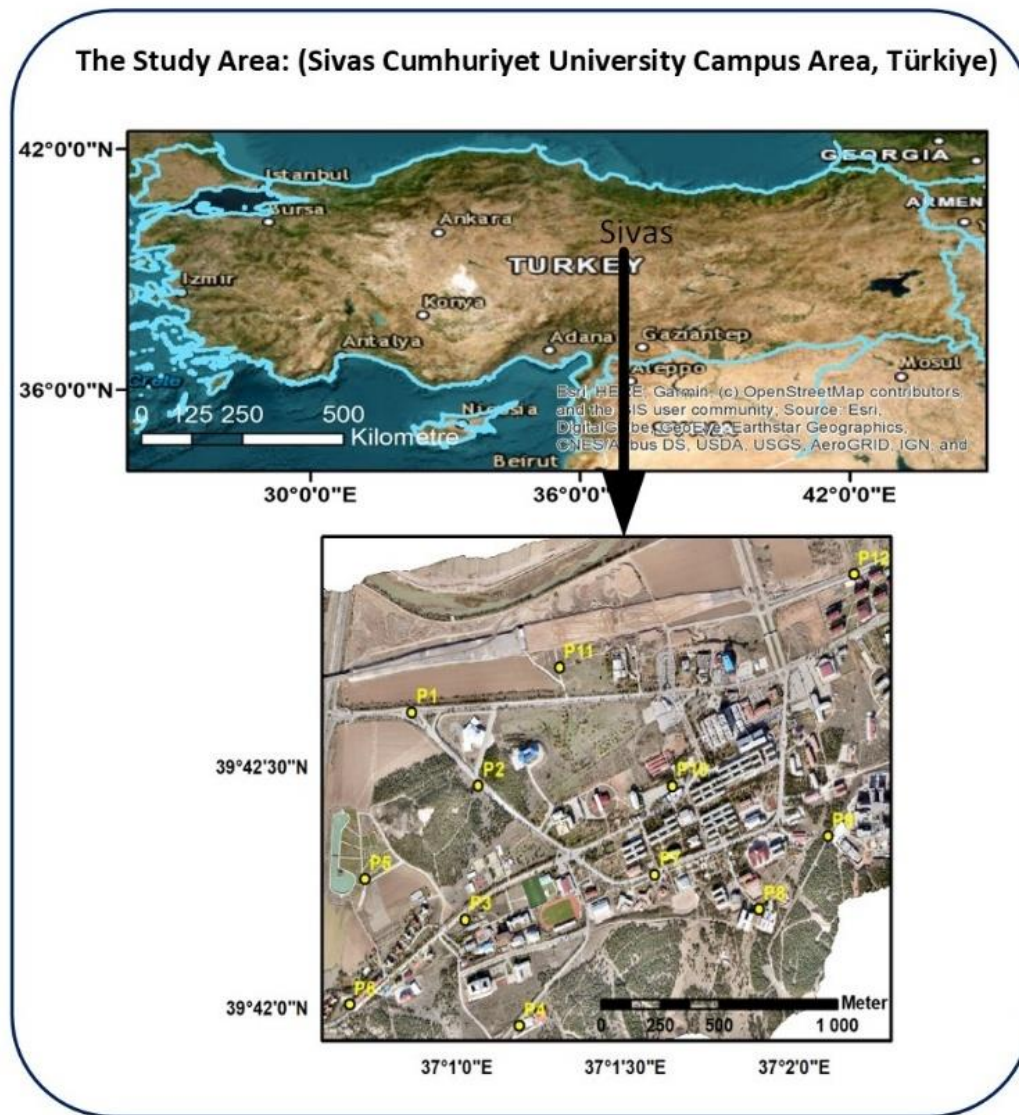


Figure 1: Study area and distribution of GCPs installed

Quantum Systems Trinity F90+ UAV with 42.4 MP (7952 X 5304 pixels) resolution, PPK/GNSS hardware and Sony RX1R II RGB camera with 35.9 mm x 24.0 mm sensor size, $f=35\text{mm}$ F2.0 lens type and manual focus vertical take-off and landing (VTOL) capability was used in the study. In the study area, 1770 images were obtained with an average GSD of 3.16 cm, 80% overlap and 60% sidelap parameters during a 1-hour flight. The process steps followed in this study are shown in Fig. 2 and some GCPs installed in the study area are shown in Fig. 3.

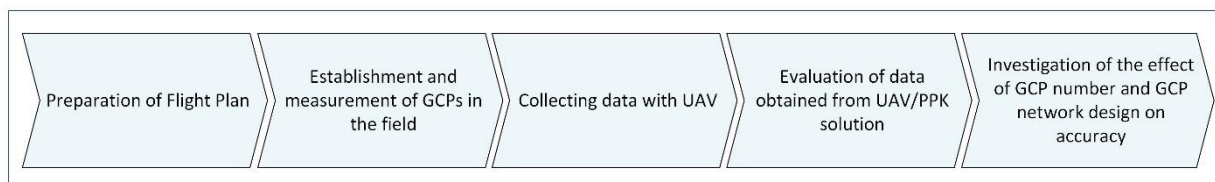


Figure 2: Workflow chart



Figure 3: Some of the GCPs installed in the study area

While GCPs contribute to the georeferencing process in photogrammetric studies, Check Points (CPs) are used to test accuracy (Ferrer-González et al., 2020; Tomaščík et al., 2019). In this study, the effect of the number and distribution of GCPs on photogrammetric product accuracy is investigated in 10 different scenarios (Table 1 and Fig. 4).

Table 1: Scenarios considering the number and distribution of GCPs (H: Homogeneous Distribution and IH: Inhomogeneous Distribution)

SN	Scenario	GCP	CP
S1	5GCP_H	1,6,8,10,12	2,3,4,5,7,9,11
S2	5GCP_IH	2,3,4,5,6	1,7,8,9,10,11,12
S3	6GCP_H	1,3,6,8,10,12	2,4,5,7,9,11
S4	6GCP_IH	1,2,3,4,5,6	7,8,9,10,11,12
S5	7GCP_H	1,3,6,8,10,11,12	2,4,5,7,9
S6	7GCP_IH	1,2,3,4,5,6,7	8,9,10,11,12
S7	8GCP_H	1,3,6,7,8,10,11,12	2,4,5,9
S8	8GCP_IH	1,2,3,4,5,6,7,11	8,9,10,12
S9	9GCP_H	1,2,3,6,7,8,10,11,12	4,5,9
S10	9GCP_IH	1,2,3,4,5,6,7,10,11	8,9,12

First, kinematic GNSS data obtained using the PPK-equipped UAV were evaluated with the help of static GNSS data. Then, accuracy assessments were performed with Pix4D Mapper v4.4.12 software in line with the UAV photogrammetry workflow.

RMSE values are widely used in accuracy assessment (Cerreta et al., 2023; Štroner et al., 2020; Villanueva & Blanco, 2019). Lower RMSE values indicate that the photogrammetric product is more accurate and precise, i.e. the difference between the model and actual observations is smaller (Cerreta et al., 2023).

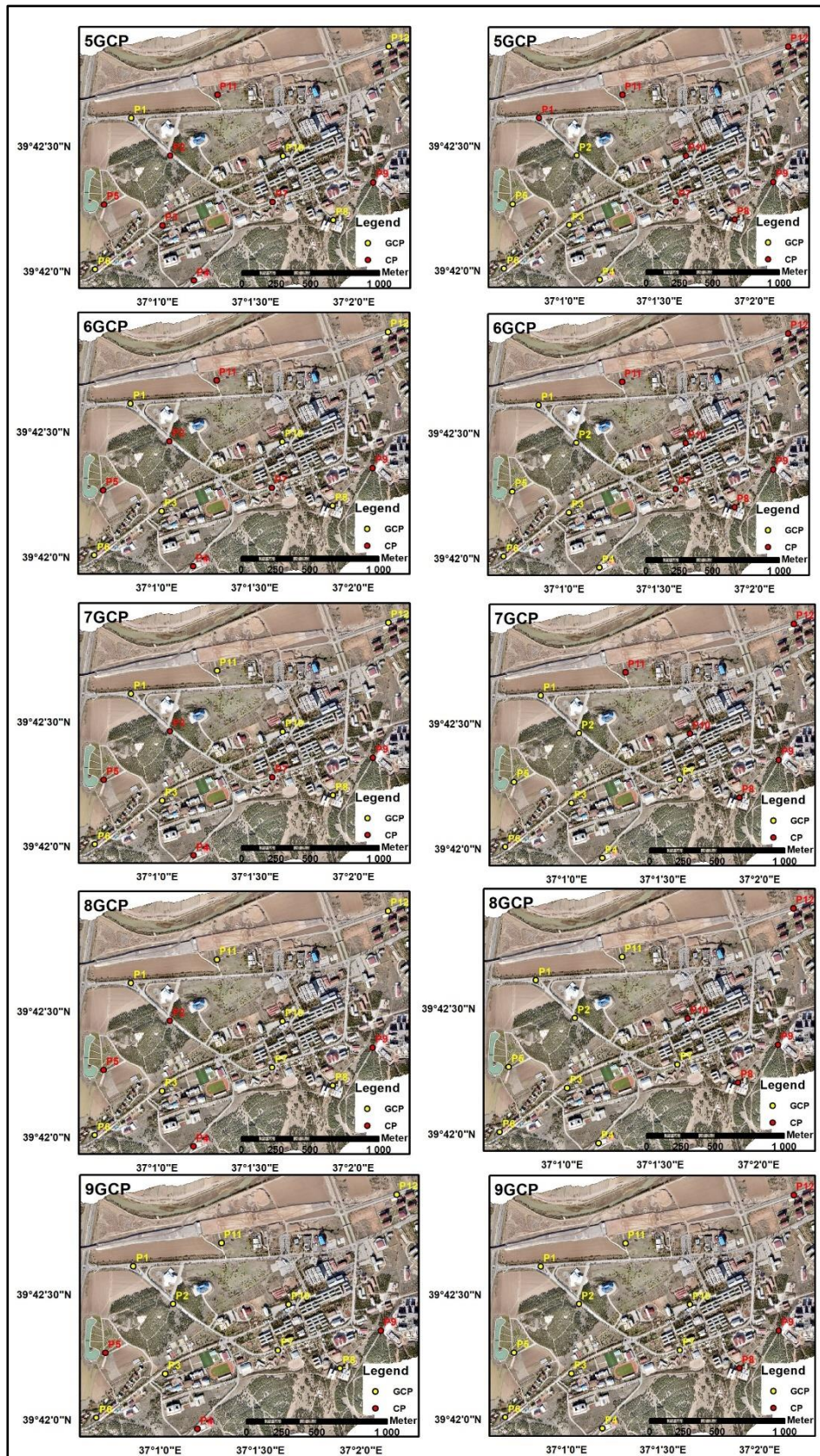


Figure 4: GCPs installed in different distributions and in different numbers (Left shows homogeneous distribution, right shows inhomogeneous distribution)

In this study, accuracy was taken into account in three different ways: horizontal, vertical and 3-dimensional (3D). Initially, the coordinate differences for the coordinate components were calculated using the following equations:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta e \\ \Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{GNSS} - n_{model} \\ e_{GNSS} - e_{model} \\ h_{GNSS} - h_{model} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where Δn , Δe and Δh are the differences between the reference position and the calculated position for the north, east and ellipsoidal height components in the Gauss Kruger projection plane with a slice width of 3° . The two-dimensional (2D) and 3D error values for each CP were calculated using these differences with the following equation:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{2D} \\ \Delta_{3D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\Delta n^2 + \Delta e^2} \\ \sqrt{\Delta n^2 + \Delta e^2 + \Delta h^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Finally, the following equation is used to calculate the RMSE values for coordinate and 2D/3D positioning accuracy:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (3)$$

Where d_i denotes the coordinate differences (Δn , Δe , and Δh), 2D positioning error (Δ_{2D}) or 3D positioning error (Δ_{3D}) for the i^{th} CP.

3. Results and Discussion

In this study, the network design of the GCPs installed in the field and the effect of the number of GCPs used on the accuracy of the photogrammetric products produced were investigated. In this context, the number of GCPs ranged from 5 to 9 were used and they were positioned according to both homogeneous and non-homogeneous distributions to cover the entire study area. Thus, it was investigated how both the increase in the number of GCPs and the distribution of GCPs in the area affect the accuracy. In other words, the effect of GCP distribution on accuracy was analyzed by designing the same number of GCPs in both homogeneous and inhomogeneous aspects. At the same time, in order to analyze the effect of the number of GCPs on accuracy, the points used in the design of 5 GCPs with homogeneous distribution were kept and new GCPs were added (Table 2). Thus, analyses were performed according to the same point accuracies. The same was done for the inhomogeneous clustered distribution, minimizing the negative impact of the terrain topography, and the direct effect of the number of GCPs on the accuracy was evaluated by considering the RMSE values (Figure 5).

Table 2: Error values (m) for the GCPs and CPs used (H: Homogeneous Distribution and IH: Inhomogeneous Distribution)

SN	Scenario	GCP	CP	RMSE _x	RMSE _y	RMSE _z	2DRMSE	3DRMSE
S1	5GCP_H	1,6,8,10,12	2,3,4,5,7,9,11	0.062	0.042	0.033	0.075	0.082
S2	5GCP_IH	2,3,4,5,6	1,7,8,9,10,11,12	0.042	0.069	0.055	0.081	0.098
S3	6GCP_H	1,3,6,8,10,12	2,4,5,7,9,11	0.065	0.038	0.033	0.075	0.082
S4	6GCP_IH	1,2,3,4,5,6	7,8,9,10,11,12	0.046	0.05	0.058	0.068	0.089
S5	7GCP_H	1,3,6,8,10,11,12	2,4,5,7,9	0.065	0.04	0.038	0.076	0.085
S6	7GCP_IH	1,2,3,4,5,6,7	8,9,10,11,12	0.045	0.044	0.063	0.063	0.089
S7	8GCP_H	1,3,6,7,8,10,11,12	2,4,5,9	0.057	0.045	0.036	0.072	0.081
S8	8GCP_IH	1,2,3,4,5,6,7,11	8,9,10,12	0.051	0.043	0.063	0.066	0.092
S9	9GCP_H	1,2,3,6,7,8,10,11,12	4,5,9	0.062	0.04	0.032	0.074	0.08
S10	9GCP_IH	1,2,3,4,5,6,7,10,11	8,9,12	0.055	0.045	0.066	0.071	0.097

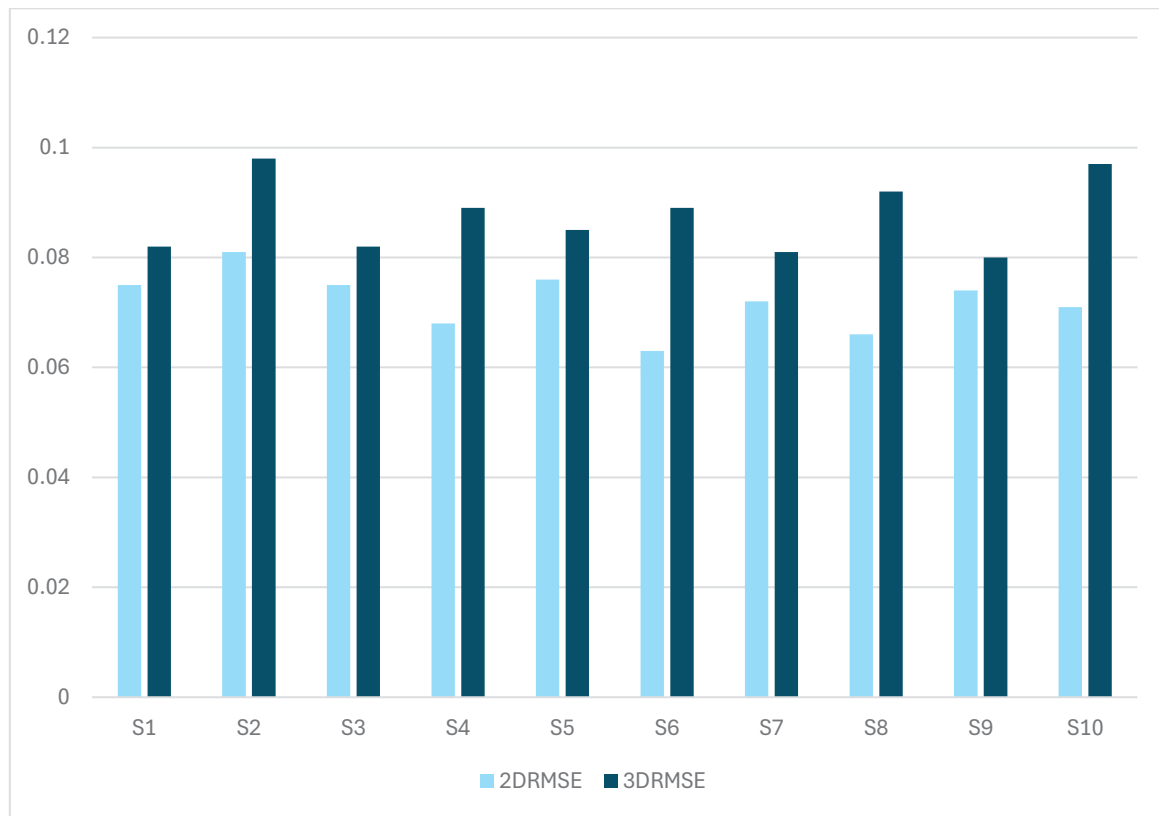


Figure 5: 2D and 3D error values (m) for 10 different GCP scenarios

When the RMSE values are analyzed in line with the findings obtained, it is seen that the homogeneous distribution of GCPs for the same number of points (homogeneous and inhomogeneous) does not provide a standard accuracy increase in 2D but increases the accuracy in 3D. When homogeneous and inhomogeneous distributions are analyzed, it is observed that the increase in the number of points does not have a standard effect on the accuracy of the product. However, it has been shown that a minimum of 5 GCP facilities, with at least one point in the center and 4 points to cover the corners of the work area, which is basically assumed in photogrammetric projects, creates mm-level differences on the accuracies in homogeneous distribution. The reason for this difference is considered to be the topographical characteristics of each point. On the other hand, no matter how many GCPs between 5 and 9 are used, if the points are not homogeneously distributed, it is observed that both 2D and 3D have irregular RMSE values at cm levels. Also, in terms of 3D location accuracy for the same number of GCPs, homogeneous distributions give better results than inhomogeneous distributions. In this context, since using extra GCPs due to differences at mm level has negative effects in terms of time and cost, it is understood that homogeneous distribution has a more meaningful effect rather than more GCPs in the field.

There are different approaches in the literature regarding the issue addressed by the researchers in this study.

[Ferrer-González et al. \(2020\)](#) evaluated the effect of the number and distribution of GCPs on the accuracy of UAV photogrammetry projects in a corridor-shaped area. By analyzing a 2.1 km long road, it was found that the accuracy increased with the increase in the number of GCPs and planimetric accuracy was better than vertical accuracy. At least 7 GCPs (3.3 GCP/km) were required to achieve $RMSE_{xy} \leq 0.031$ m and $RMSE_z \leq 0.081$ m accuracy. The best results were obtained with configurations where the GCPs were placed in pairs on both sides of the road in an offset pattern and at the ends of the corridor. In particular, distributions with 9 or 11 GCPs were the best solutions in terms of accuracy (RMSE of 0.028-0.029 m horizontally and 0.055-0.057 m vertically) and fieldwork efficiency. A distribution using 18 GCPs provided similar accuracy, but increased fieldwork time. Therefore, an offset distribution with 9-11 GCPs is recommended to optimize

fieldwork without loss of accuracy. However, they emphasized that additional studies are needed to determine whether these findings are valid for different terrain morphologies.

[Sanz-Ablanedo et al. \(2018\)](#), in an area of 1200 hectares with high relief, used more than 2500 photographs and 102 ground points. The results show that the accuracy depends on both the number and the distribution of GCPs. When using a small number of GCPs, the RMSE is about ± 5 times the average GSD, while using more than 2 GCPs per 100 images, the RMSE converges to about twice the GSD. As in conventional photogrammetry, the vertical errors in SfM photogrammetry are about 2.5 times larger than the horizontal components. The best accuracy was achieved by evenly distributing the GCPs in a triangular grid, which minimizes the maximum distance to any GCP. In the case of poor distribution, accuracy can be up to twice as low as that of an optimal distribution. In large projects, high accuracy can only be achieved when using at least 3 GCPs per 100 images, and even adding oblique images, high overlap, or diagonal stripes cannot compensate for insufficient GCP utilization.

[Agüera-Vega et al. \(2017a\)](#) stated that in general, there is a tendency to decrease in RMSE values as the number of GCPs increases, but they emphasized that there is no significant difference between 15 and 20 GCPs in an area of approximately 18 ha, and 15 GCPs are optimum when evaluated in terms of labor and cost. [Liu et al. \(2022\)](#) stated that the number of GCPs increases the accuracy up to 12 GCP/km², but there is no significant increase after that, but the uniform distribution of the GCPs and their proximity to the center have positive effects on the accuracy. [Tomaščík et al. \(2017\)](#), in their study on determining the accuracy between 4 GCPs and 9 GCPs, stated that the more precise measurement of the installed GCPs has a greater effect on the accuracy rather than the amount of GCPs in similarly distributed GCPs. [Agüera-Vega et al. \(2017b\)](#) stated that although the increase in the number of GCPs increases the horizontal accuracy, the number of GCPs does not affect the vertical accuracy. [Martínez-Carricondo et al. \(2018\)](#) emphasized that the best planimetric (2D) accuracy is obtained if the GCPs are placed at the corners of the study area, while the best 3D accuracy can be obtained if they are at different heights with a stratified distribution. [Hastaoglu et al. \(2023\)](#) emphasized that only increasing the number of GCPs will not improve the location accuracy, and that an accurate GCP design is required by considering the topographical and geometric structure. To summarize, although some researchers in the literature draw attention to the increase in the number of GCPs in terms of accuracy, some researchers believe that this alone will not be sufficient.

In this study conducted in the 6 km² Sivas Cumhuriyet University campus area, it is shown that the distribution of at least one GCP in the center and homogeneously distributed in the corners significantly increases the 3D position accuracy of the products produced by UAV photogrammetry, and that higher accuracy results can be obtained if the GCPs are designed in a correct network rather than the number of GCPs.

4. Conclusion

This study was conducted to evaluate the effects of the number and distribution of GCPs on the accuracy of UAV photogrammetry projects. As a result of the analysis, it is emphasized that in order to maximize the accuracy obtained with UAV photogrammetry, it is necessary to ensure a homogeneous distribution of the GCPs in the work area. It was revealed that the homogeneous distribution of GCPs is more important than the number of GCPs. It is observed that if the same number of GCPs are installed, GCPs clustered (inhomogeneously) in a certain area provide lower 3D position accuracy than GCPs distributed over the entire area. As a result, it has been determined that in UAV Photogrammetry projects, installing GCPs appropriately distributed in the center and edges of the study area in accordance with the topographical and morphological structure of the terrain increases the accuracy of the product obtained. Thus, it has been revealed that the workload, time and

cost burden of installing too many GCPs can be brought to optimum levels with the correct GCP network design.

Acknowledgements

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (Project Grant Number: TÜBİTAK 122Y125) and Sivas Cumhuriyet University (CÜBAP M855).

Author Contribution

Tarık Turk: Conception, Design, Literature review, Data collection, Analysis and interpretation, Writing, Supervision, Review of article. **Berkay Bahadır:** Literature review, Writing, Review of article. **Yasin Demirel:** Literature review, Data collection, Analysis, Writing, Review of article. **Cemali Altuntas:** Literature review, Writing, Review of article. **Taylan Ocalan:** Writing, Review of article.

Declaration of Competing Interests

The authors declare that they have no known relevant competing financial or non-financial interests that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227.
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 143(2), 04016025.
- Cerreta, J., Thirtyacre, D., Miller, P., Burgess, S. S., & Austin, W. J. (2023). Accuracy Assessment of the eBee Using RTK and PPK Corrections Methods as a Function of Distance to a GNSS Base Station. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 10(3), 4.
- Deliry, S. I., & Avdan, U. (2024). Accuracy assessment of UAS photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(2), 165-190.
- Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote sensing*, 12(15), 2447.
- Gencer, E. Y. (2016). *An analysis of the production state of a construction project with the unmanned aerial vehicle photogrammetry application* (Master Thesis). Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.
- Harwin, S., & Lucieer, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, 4(6), 1573-1599.
- Hastaoglu, K. O., Kapicioglu, H. S., Gül, Y., & Poyraz, F. (2023). Investigation of the effect of height difference and geometry of GCP on position accuracy of point cloud in UAV photogrammetry. *Survey Review*, 55(391), 325-337.
- Hughenoltz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B. J., LeClair, A., Riddell, K., & Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16-24.
- Liu, X., Lian, X., Yang, W., Wang, F., Han, Y., & Zhang, Y. (2022). Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*, 6(2), 30.
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied*

- earth observation and geoinformation*, 72, 1-10.
- Mozas-Calvache, A. T., Pérez-García, J. L., Cardenal-Escarcena, F. J., Mata-Castro, E., & Delgado-García, J. (2012). Method for photogrammetric surveying of archaeological sites with light aerial platforms. *Journal of Archaeological Science*, 39(2), 521-530.
- Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2-11.
- Okuyama, S., Torii, T., Nawa, Y., Kinoshita, I., Suzuki, A., Shibuya, M., & Miyazaki, N. (2005). Development of a remote radiation monitoring system using unmanned helicopter. *International congress series*, 1276, 422-423.
- Ollero, A., & Merino, L. (2006). Unmanned aerial vehicles as tools for forest-fire fighting. *Forest Ecology and Management*, 234(1), S263.
- Oniga, V. E., Breaban, A. I., Pfeifer, N., & Chirila, C. (2020). Determining the suitable number of ground control points for UAS images georeferencing by varying number and spatial distribution. *Remote Sensing*, 12(5), 876.
- Ozdaz, N., Kocak, M. G., & Karakis, S. (2024). Examining the accuracy of DEM of difference and 3D point cloud comparison methods: Open pit mine case study. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 11(1), 41-50.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606.
- Štroner, M., Urban, R., Reindl, T., Seidl, J., & Brouček, J. (2020). Evaluation of the georeferencing accuracy of a photogrammetric model using a quadcopter with onboard GNSS RTK. *Sensors*, 20(8), 2318.
- Tomaščík, J., Mokroš, M., Saloň, Š., Chudý, F., & Tunák, D. (2017). Accuracy of photogrammetric UAV-based point clouds under conditions of partially-open forest canopy. *Forests*, 8(5), 151.
- Tomaščík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas?. *Remote sensing*, 11(6), 721.
- Turk, T., & Ocalan, T. (2020). PPK GNSS sistemine sahip insansız hava araçları ile elde edilen fotogrametrik ürünlerin doğruluğunun farklı yaklaşımlarla irdelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(1), 22-28 (in Turkish).
- Turk, T., Tunalioglu, N., Erdogan, B., Ocalan, T., & Gurturk, M. (2022). Accuracy assessment of UAV-post-processing kinematic (PPK) and UAV-traditional (with ground control points) georeferencing methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(7), 476.
- Villanueva, J. K. S., & Blanco, A. C. (2019). Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM). *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 42, 167-174.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Xiang, H., & Tian, L. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*, 108(2), 174-190.
- Zhang, H., Aldana-Jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F., Vanacker, V., & van Oost, K. (2019). Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection. *Earth Surface Dynamics*, 7(3), 807-827.

Düzeltilme: Arazi ve arsa düzenlemesinde kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının incelenmesi

Ahmet Yılmaz^{1*} , Oytun Yılmaz¹ 

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, Türkiye.

Düzeltilme: Yılmaz, A., & Yılmaz, O. (2024). Arazi ve arsa düzenlemesinde kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının incelenmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 11(2), 171-189. <https://doi.org/10.9733/JGG.2024R0012.T>

Yılmaz ve Yılmaz (2024) makalesinde, yazarlar tarafından Eşitlik (2)'nin eksik yazıldığı tespit edilerek hatanın giderilmesi amacıyla bu düzeltme metni sunulmuştur. Söz konusu düzeltme eşitliğin yazımına ilişkin olup eşitliğin sonucu olarak verilen değeri ve makalede yer alan hesaplamaları, sonuçları ya da değerlendirmeleri etkilememektedir.

Eşitlik (2) aşağıda verildiği gibi düzeltilmiştir.

$$KT = \left[\left[\sum UHA - \sum kad.yol (0,00) - \sum bağış (0,00) - \sum tahsis_{belediye} (6.884,97) \right] - \left[\left(\sum_{i=1}^n A_i \right) - \sum kad.yol (0,00) - \sum bağış (0,00) - \sum tahsis_{belediye} (6.884,97) \right] \times 0,45 \right] \times \frac{100}{55} \quad (2)$$

Corrigendum: An analysis of the allocation for expropriation approach in land readjustment

Corrigendum: Yılmaz, A., & Yılmaz, O. (2024). Arazi ve arsa düzenlemesinde kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının incelenmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 11(2), 171-189. <https://doi.org/10.9733/JGG.2024R0012.T>

In the article by Yılmaz and Yılmaz (2024), it was determined that Equation (2) was incompletely written by the authors. This corrigendum is provided to rectify the error. The corrigendum pertains solely to the notation of the equation and does not affect the given result, calculations, conclusions, or evaluations presented in the article.

Equation (2) was corrected as given below.

$$KT = \left[\left[\sum UHA - \sum kad.yol (0,00) - \sum bağış (0,00) - \sum tahsis_{belediye} (6.884,97) \right] - \left[\left(\sum_{i=1}^n A_i \right) - \sum kad.yol (0,00) - \sum bağış (0,00) - \sum tahsis_{belediye} (6.884,97) \right] \times 0,45 \right] \times \frac{100}{55} \quad (2)$$

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi

Journal of Geodesy and Geoinformation

İÇİNDEKİLER - CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- Assessment of GNSS-IR performance using multi-GNSS and multi-frequency SNR data from smartphones
Akıllı telefonların çok frekanslı çoklu-GNSS SNR verilerinin GNSS-IR performansının değerlendirilmesi 1-19
Cemali ALTUNTAŞ, Nursu TUNALIOĞLU
- Ortalama kaydırma algoritması kullanarak küresel radyal tabanlı fonksiyonlar ile bölgesel gravite modellemeleri için veri uyarlamalı ağ tasarımı
A data-adaptive network design using the mean shift algorithm for regional gravity field modeling with spherical radial basis functions 20-31
Raşit ULUĞ
- VMF veri sunucusundan türetilen grid bazlı VMF3 ve GPT3 troposfer modellerinin karşılaştırılması: Avrupa bölgesi için bir çalışma
Comparison of the grid-wise VMF3 and GPT3 troposphere models derived from the VMF data server: A study for the European region 32-41
Ali Utku AKAR, Cevat İNAL
- Performance assessment of interpolation techniques for investigation Covid-19 spread in Türkiye
Türkiye’de Covid-19 yayılımının araştırılmasında enterpolasyon tekniklerinin performans değerlendirmesi 42-57
Duygu ARICAN, Nursu TUNALIOĞLU
- Konumsal-zamansal taşınmaz değer değişim dinamiklerinin CBS ve istatistiksel analiz teknikleri ile incelenmesi
Investigating spatio-temporal real estate value fluctuation dynamics with GIS and statistical analysis techniques 58-76
Süleyman ŞİŞMAN, Nilay TELLİOĞLU, Arif Çağdaş AYDINOĞLU
- Investigation of the effect of GCP number and distribution on photogrammetric product accuracy in UAV photogrammetry
İHA fotogrametrisinde YKN sayısı ve dağılımının fotogrametrik ürün doğruluğuna etkisinin araştırılması 77-88
Tarık TÜRK, Berkay BAHADUR, Yasin DEMİREL, Cemali ALTUNTAŞ, Taylan ÖCALAN

DÜZELTME/CORRIGENDUM

- Arazi ve arsa düzenlemesinde kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının incelenmesi
An analysis of the allocation for expropriation approach in land readjustment 89-89
Ahmet YILMAZ, Oytun YILMAZ