

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 konular 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



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).

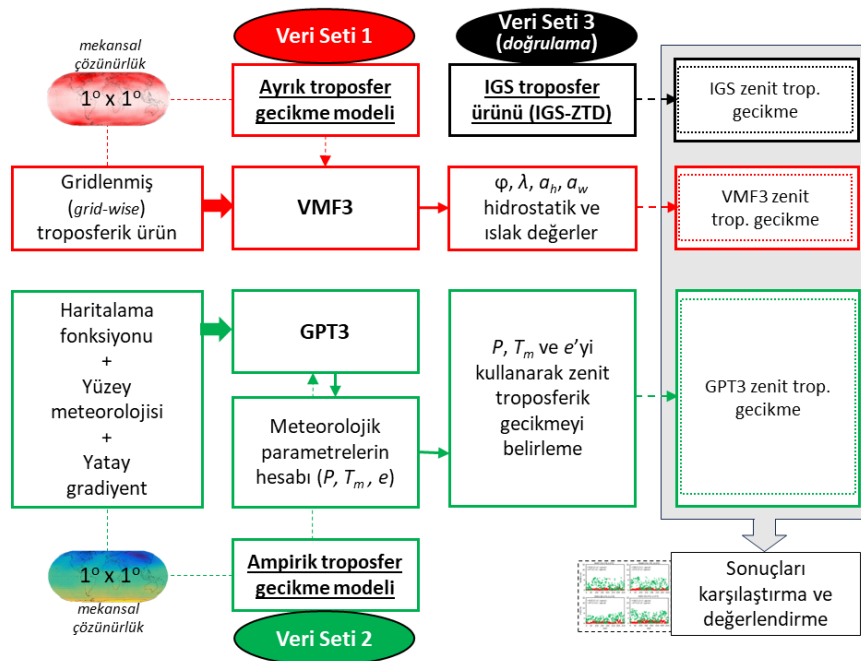
Bu sorunun çözümüne yönelik Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), yeniden analiz verilerini kullanarak Sayısal Hava Durumu Tahmini (Numerical Weather Prediction, NWP) ürünlerini geliştirmiştir. Meteorolojik veri arşivi sayesinde hava durumu 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; ayrık 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

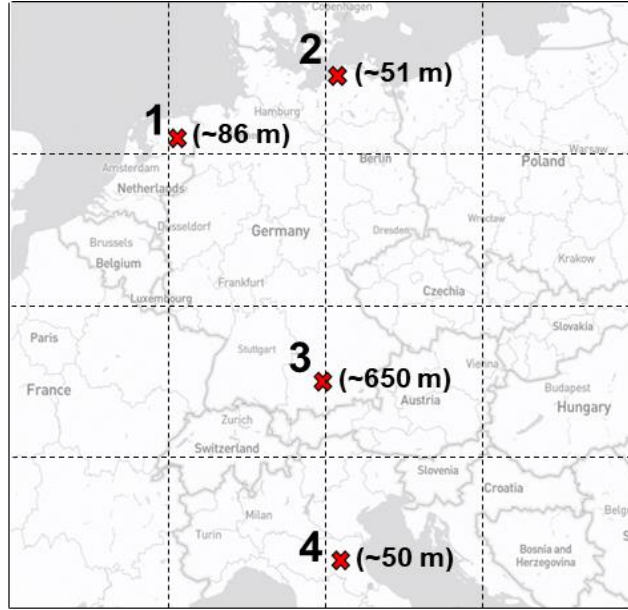
Çalışma kapsamında seçilmiş ve en son sürümler olan VMF3 ile GPT3 modellerinin ZTD kestirimindeki performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Amaca yönelik hazırlanan metodoloji Şekil 1'de verilmiştir.



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

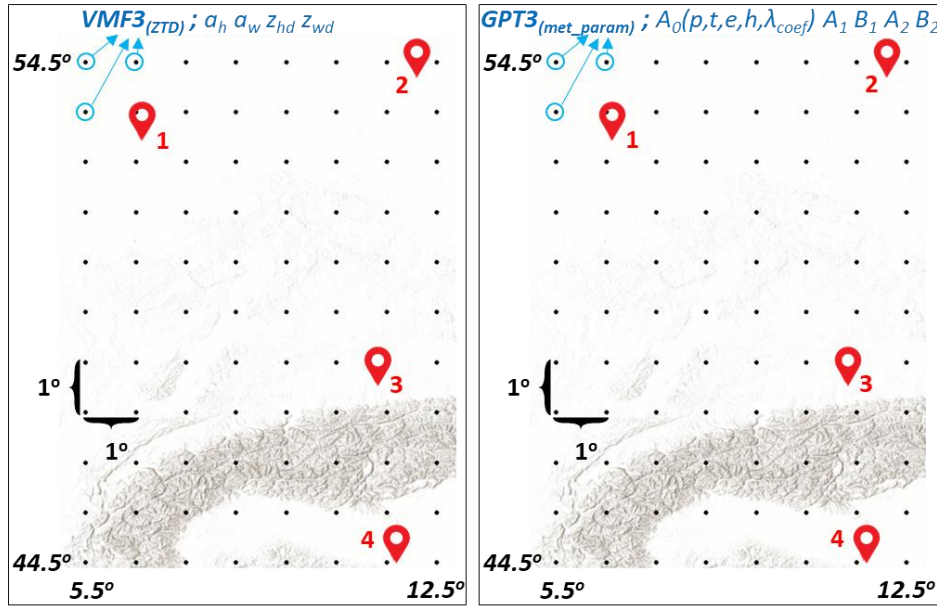
IGS analiz merkezi, yer tabanlı GNSS gözlemlerine dayalı olarak elde edilen troposferik gecikme düzeltme ürünlerini sunmaktadır ([Teunissen & Montenbruck, 2017](#)). Troposferik üründeki veri dosyaları; ZTD, kuzey ve doğu troposfer gradyan bileşenlerinin beş dakikalık tahminlerini içerir. Veriler, IGS 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.

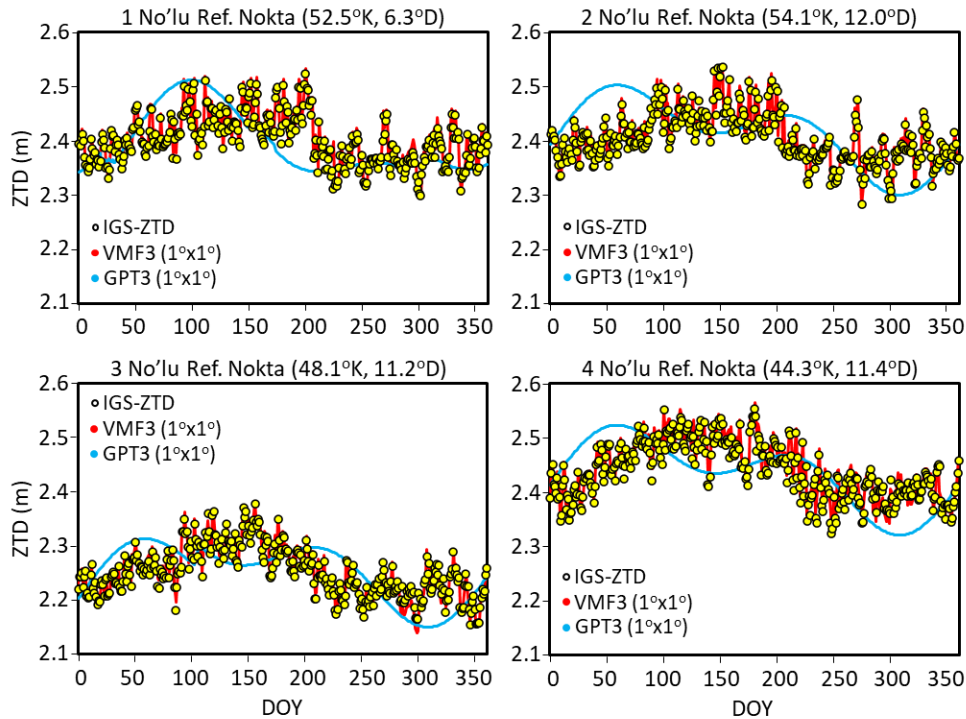


Şekil 3: (a) VMF3 ve (b) GPT3 verilerinin bilineer enterpolasyonu yoluyla dört referans noktasındaki ZTD'lerin kestirimi

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).



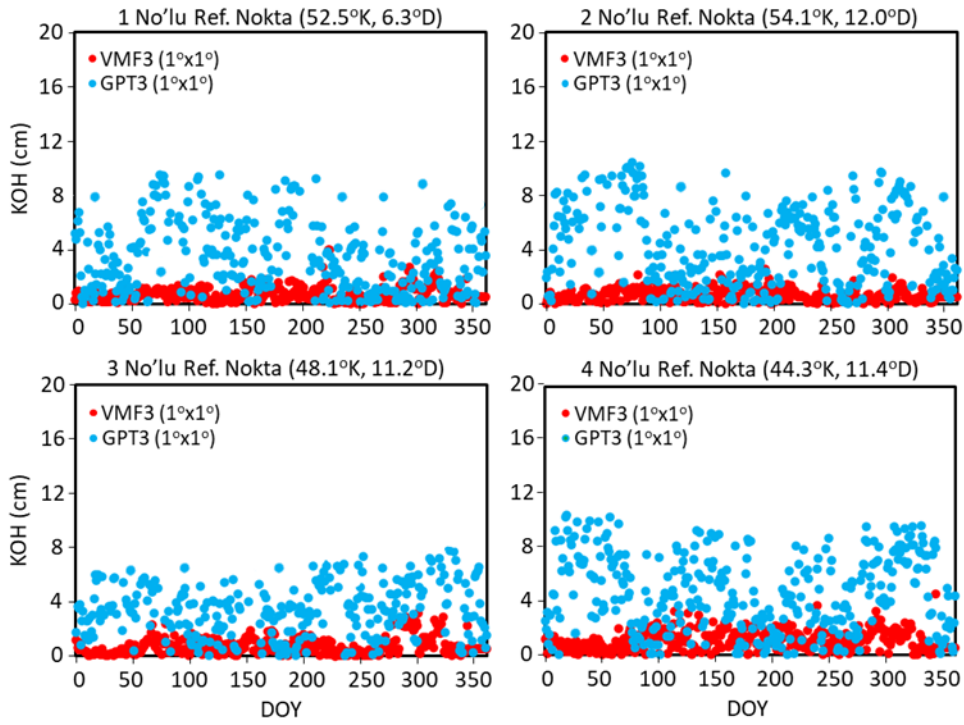
Şekil 4: Farklı troposferik ürünlerden elde edilen ZTD zaman serileri

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 eksenden 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 ayrık (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

kıyasla 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.
- Bahadır, 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).