

ZTD yükseklik düzeltme modellerinin araştırılması: Orta Avrupa örneği

Ali Hasan Doğan^{1*} 

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye.

Öz: Yüksek doğruluklu troposfer ürünleri hassas nokta konumlamada kilit bir rol oynamaktadır. Başucu yönündeki troposferik gecikme (Zenith Tropospheric Delay, ZTD), basınç ve sıcaklık gibi parametreler troposfer modelleri yardımıyla elde edilmektedir. Ancak, troposfer modelleri belirli grid veya model yükseklikleri için üretildiğinden, parametrelere yükseklik düzeltmelerinin getirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Orta Avrupa için üstel, kübik ve hibrit yaklaşım olmak üzere farklı yükseklik düzeltme modelleri incelenmiştir. Bu kapsamda ZTD değerleri 2020-2022 yılları arası ERA5 verileri kullanılarak DNS (Direct Numerical Solutions) yazılımı ile hesaplanmıştır. En yüksek model doğruluğu hibrit yaklaşım ile elde edilmiştir. Ancak, GNSS istasyonlarına dayalı analizlerde üstel ve kübik yaklaşım ile daha yüksek doğruluğa ulaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: ZTD, DNS, GNSS, Doğruluk

Investigation of the height correction model of ZTD: Case study of Central Europe

Abstract: High accuracy tropospheric products play a key role in precise positioning. The parameters, such as Zenith Tropospheric Delay (ZTD), pressure and temperature, are obtained by troposphere models. However, height corrections should be considered for the parameters since troposphere models are produced for specific grid or model heights. In this study, different height correction models, named as exponential, cubic and hybrid, were investigated for Central Europe. In this context, ZTDs were calculated by using the data of ERA5 between 2020 and 2022 with Direct Numerical Solutions (DNS) software. The highest model accuracy was obtained by hybrid approach. However, higher accuracy was achieved in the analysis based on GNSS stations using exponential and cubic approaches.

Keywords: ZTD, DNS, GNSS, Accuracy

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 356 252 1616 / 2873

Geliş Tarihi/Received: 05.02.2026
Kabul Tarihi/Accepted: 25.02.2026



0000-0002-8490-890X, alihasan.dogan@gop.edu.tr (Doğan A.H.)*

1. Giriş

Troposfer tabakası içeriğindeki kuru hava ve su buharından dolayı Küresel Navigasyon ve Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) başta olmak üzere uzay jeodezi tekniklerinde sinyal gecikmelerine neden olmaktadır. Özellikle yüksek konum doğruluğu gerektiren uygulamalarda bu gecikmelerin giderilmesi veya modellenmesi gerekmektedir. GNSS ile 20-30 km'den küçük baz uzunluğuna sahip ağlarda troposferik etkiler ölçü farkları ile giderilebilmektedir (Lin, 1997). Ancak gerek bazların uzun olduğu ağlarda gerekse mutlak konum belirlemede troposferik etkilerin nokta özelinde belirlenmesi gerekmektedir. Uzay jeodezisi tekniklerinde bu etki başucu yönündeki troposferik gecikme (Zenith Tropospheric Delay, ZTD) ve izdüşüm fonksiyonları (Mapping Functions, MFs) kullanılarak modellenmektedir (Hofmann-Wellnhof vd., 2007). ZTD, başucu yönündeki kuru (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) ve ıslak gecikme (Zenith Wet Delay, ZWD) toplamından oluşmaktadır. ZHD her ne kadar atmosferik basınç ve istasyon yüksekliği bilgileri ile yüksek doğruluk ile belirlenebilse de (Davis vd., 1985; Saastamoinen, 1972), ZWD su buharının ani ve düzensiz değişiminden dolayı yüksek doğruluk ile belirlenmemektedir (Landkron & Böhm, 2018). Bu nedenle uzay jeodezisi tekniklerinde ZHD önsel gecikme olarak dengeleme modeline dahil edilir ve ZWD dengeleme sonucunda kestirilir (Zus vd., 2021). Ancak, istasyon için yüksek doğruluklu sıcaklık, su buharı basıncı ve su buharı bilgisi biliniyorsa ZWD değeri ampirik yaklaşımlar ile hesaplanabilmektedir (Askne & Nordius, 1987).

ZHD ve ZWD değerlerinin belirlenebilmesi için meteorolojik gözlem gerekmektedir. Ancak her noktada ve her an meteorolojik gözlem yapmak mümkün olmadığından Küresel Sıcaklık ve Basınç (Global Pressure and Temperature, GPT) gibi modeller kullanılarak meteorolojik parametreler belirlenebilmektedir (Böhm vd., 2007). Bu modeller temelde iki farklı yaklaşım kullanılarak oluşturulmaktadır. Birinci yaklaşımda modellenecek parametreler küresel harmonik fonksiyonlara açılır ve istasyonların yaklaşık koordinatlarına bağlı olarak parametreler elde edilir (Ör., GPT). İkinci yaklaşımda ise bölgesel veya küresel ölçekte grid noktaları belirlenir ve bu grid noktaları için modeller oluşturulur. Daha sonra ilgili istasyon için enterpolasyon işlemi gerçekleştirilir (Ör. GPT2, Lagler vd., 2013). İlk yaklaşımda tüm parametreler aynı yatay düzlemde modellenirken, ikinci yaklaşımda model parametreleri her bir grid yüksekliği için geçerlidir. Bu nedenle her iki yaklaşım için de en kritik sorun parametrelere getirilecek yükseklik düzeltmesidir. İstasyon yükseklikleri model yüksekliklerinden farklı olduğundan basınç, sıcaklık ve su buharı basıncı gibi meteorolojik parametrelere veya bu parametreler sonucunda elde edilen ZTD değerlerine getirilecek yükseklik düzeltmesi özellikle yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda büyük bir önem arz etmektedir. Ayrıca, gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (Real-Time Precise Point Positioning, RT-PPP) ve gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic) uygulamaları için atmosferik/troposferik düzeltmelerin önemi dikkate alındığında troposfer modellerinin ve yükseklik düzeltmelerinin oynadığı kritik rol görülmektedir. Önsel troposferik gecikme değerlerinin hem ölçü sonrası (Zheng vd., 2018) hem de gerçek zamanlı (Doğan, 2026; Wilgan vd., 2017) PPP uygulamalarında yakınsama süresini düşürdüğü göz önüne alındığında ZTD için yükseklik düzeltme modelinin önemi daha da öne çıkmaktadır.

Literatürdeki modeller incelendiğinde, ZTD'nin yüksekliğe bağlı değişiminde kuadratik (Song vd., 2011), üstel (Huang vd., 2021; Wang vd., 2022) ve hibrit (Lei vd., 2024) yaklaşımların yer aldığı ve bu çalışmalar incelendiğinde özellikle negatif üstel yaklaşımın sıklıkla tercih edildiği görülmüştür. Örneğin Wang vd. (2025) geliştirdiği ampirik troposferik gecikme modeli için negatif üstel fonksiyonu tercih etmiştir. Huang vd. (2021) negatif üstel yaklaşım kullanarak global ölçekte ürettiği yükseklik düzeltme modeli ile radyosonda verilerine dayalı analizlerde GPT2w modelinde %8 oranında iyileşme yakalamıştır. Li vd. (2023) geliştirdiği kübik fonksiyonun %6 oranında iyileşme göstermesinin yanı sıra GNSS çözümlerinde yükseklik bileşeninde yüksek performans sağlandığını vurgulamıştır. Lei vd. (2024) farklı yükseklik katmanları için farklı hibrit fonksiyonlar (üstel ve polinom) ile geliştirdiği model ile tamsayı belirsizliği ve konum doğrulukları için çözümlerin

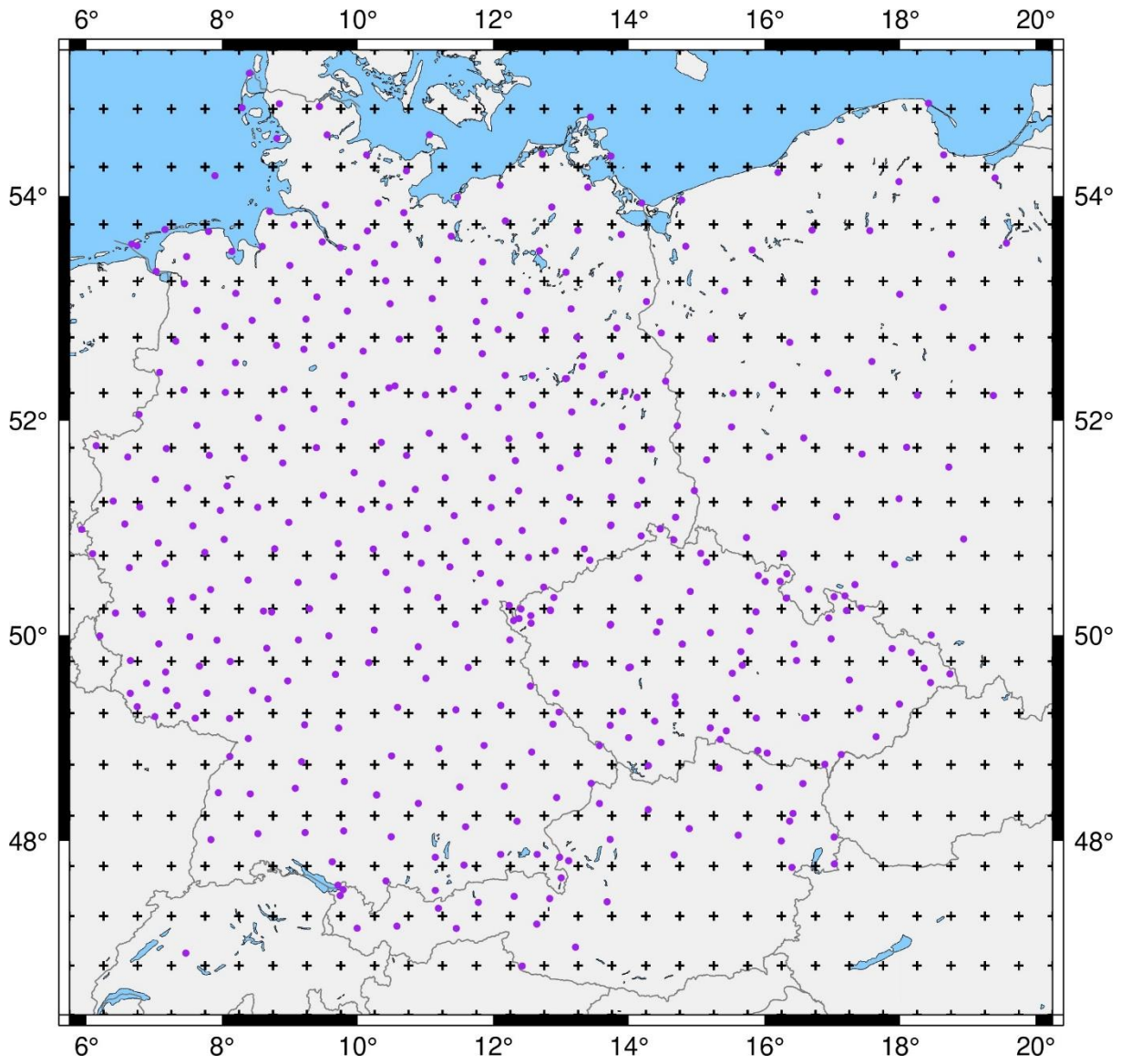
sırasıyla %13.3 ve %51.4 oranında iyileştiğini vurgulamaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ZTD yükseklik düzeltmesi için standart bir yaklaşımın olmadığı ve farklı yaklaşımlar ile farklı doğrulukların elde edildiği görülmüştür. Bu çalışmada ise negatif üstel fonksiyon (Huang vd., 2021), kübik polinom (Li vd., 2023) ve bu iki yaklaşımın hibrit fonksiyonunun ZTD üzerine etkisi incelenmiştir. Literatürdeki farklı global ve bölgesel modeller göz önüne alındığında yaklaşımların farklı bölgelerde farklı sonuçlar verebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle çalışma alanı olarak Orta Avrupa bölgesi seçilmiştir. ZTD değerleri ERA5'in 2020-2022 yılları arası verileri kullanılarak DNS (Direct Numerical Solutions) yazılımı ile elde edilmiştir. ZTD düzeltme modelleri her üç yaklaşım ile belirlenen grid noktaları için oluşturulmuş ve GNSS istasyonları için elde edilen ZTD değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2. Veri ve Yöntem

Bu bölümde ZTD yükseklik düzeltme modeli oluşturulurken kullanılan verilerden, çalışma alanından ve uygulanan yaklaşımlardan bahsedilecektir. Modellerin oluşturulabilmesi için düşey profil boyunca meteorolojik parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu sayede ilgili profil boyunca ZHD, ZWD ve toplamı olan ZTD değerleri hesaplanabilmektedir. Bu düşey profil verisi radyosonda ve sayısal hava modelleri (Numerical Weather Models, NWMs) olmak üzere iki şekilde elde edilebilir. Ancak literatürde de belirtildiği gibi radyosonda verileri düşük zamansal ve konumsal çözünürlüklü olduğundan NWM verileri ile daha yüksek doğruluğa sahip modeller oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) tarafından üretilen ERA5 veri seti kullanılmıştır. ERA5, küresel ölçekte 0.25° konumsal ve 1 saatlik zamansal çözünürlük ile üretilmektedir (Hersbach vd., 2020). Ancak bu çalışmada yoğun hesap yükünü azaltmak için modeller 0.50° konumsal çözünürlükteki grid noktaları için oluşturulmuştur. Şekil 1'de çalışma alanı gösterilmektedir. Şekil 1'den de görülebileceği üzere 5.75°-20.25° doğu boylamları ve 46.25°-55.25° kuzey enlemleri arasında yer alan Orta Avrupa bölgesi çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Şekilde grid noktalarına ek olarak doğruluk analizlerinde kullanılacak olan GNSS istasyonları da mor daireler ile gösterilmektedir. Çalışma alanı incelendiğinde GNSS istasyonlarının Almanya, Polonya, Çekya, Avusturya ve İsviçre'de yer aldığı görülmektedir.

ZTD yükseklik modellerinin oluşturulabilmesi için aynı noktaya ait farklı yüksekliklerdeki ZTD değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların çoğunlukla kullanılan profil NWM verilerinin basınç seviyeleri için bu değerleri elde ettiği ve daha sonra modelleri oluşturduğu görülmektedir. Ancak bu çalışmada düşey profil boyunca çözünürlüğü artırabilmek için her bir grid noktasının yüksekliği 250'şer metre artırılarak yeni noktalar oluşturulmuştur. Bu aşamada grid noktasının yüksekliği ve 250'ye tam bölünebilecek şekilde 10 km üst sınıra kadar yükseklikler tanımlanmış ve her bir grid noktasında her bir yükseklik için ZTD değerleri elde edilmiştir. Zamansal çözünürlük olarak 6 saat seçilmiştir. ZTD değerleri ışın izleme yöntemi ile DNS yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. DNS, ışın izleme yöntemi ile sinyal gecikmelerini hesaplayabilen açık kaynak kodlu bir yazılımdır (Zus vd., 2025). DNS yazılımı ile troposferik gecikmelerin yanı sıra iyonosfer tabakası kaynaklı gecikmeler ve toplam elektron içeriği (Total Electron Content, TEC) gibi değerler de elde edilebilmektedir. DNS ile gecikme değerlerinin hesaplanabilmesi için enlem, boylam ve elipsoidal yükseklik bilgilerinin yer aldığı istasyon listesinin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada istasyon listesi hazırlanırken grid nokta koordinatlarının yanı sıra 250 metre aralıklı düşey profil koordinatları da dikkate alınmıştır.

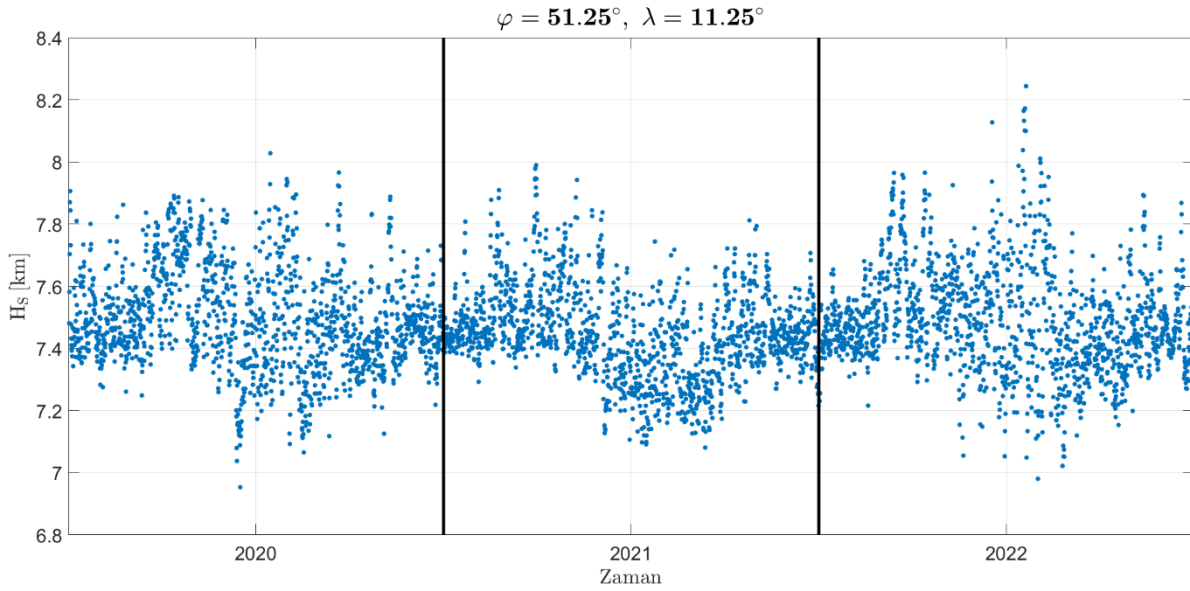


Şekil 1: Çalışma alanı

Bu çalışmada grid noktaları için üç farklı yaklaşım ile ZTD yükseklik düzeltme modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunlar; negatif üstel fonksiyon, kübik polinom ve hibrit fonksiyon olarak tanımlanabilir. Negatif üstel fonksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Huang vd., 2021).

$$ZTD = ZTD_g \times \exp\left(-\frac{H-H_g}{H_s}\right) \quad (1)$$

Burada, ZTD_g referans noktasındaki ZTD değerini, H ve H_g sırasıyla hedef ve referans noktasının yüksekliğini (km) ve H_s yükseklik ölçek faktörünü (km) ifade etmektedir. Modelin oluşturulabilmesi için bu yükseklik ölçek faktörlerinin kestirilmesi gerekmektedir. Şekil 2’de bir grid noktası için 6 saatlik çözünürlükteki 3 yıllık H_s değerleri gösterilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde H_s değerlerinin mevsimsel etkiyi içerdiği görülebilmektedir. Bu nedenle H_s ölçek faktörleri mevsimsel etkiyi içerecek şekilde Eşitlik 2 kullanılarak yeniden modellenmiştir. Bu sayede daha az parametreyle sadece yılın günü (Day of Year, DOY) bilgisi kullanılarak ölçek faktörleri elde edilebilecektir.

Şekil 2: H_s zaman serisi

$$H_s = a + b_1 \cos 2\pi \frac{\text{DOY}}{365.25} + b_2 \sin 2\pi \frac{\text{DOY}}{365.25} + c_1 \cos 4\pi \frac{\text{DOY}}{365.25} + c_2 \sin 4\pi \frac{\text{DOY}}{365.25} \quad (2)$$

Burada, a ortalama değeri, b_1 ve b_2 yıllık etkiyi ve c_1 ve c_2 yarıyıllık etkiyi ifade etmektedir.

Li vd. (2023) kübik polinom yaklaşımını aşağıdaki şekilde ifade etmektedir (Eşitlik 3). Eşitlik 3'te yer alan her bir L_i katsayısı negatif üstel yaklaşımda olduğu gibi mevsimsel etkiyi içerecek şekilde yeniden modellenmektedir.

$$\text{ZTD} = \text{ZTD}_g + L_1(H^3 - H_g^3) + L_2(H^2 - H_g^2) + L_3(H - H_g) \quad (3)$$

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen üçüncü yaklaşımda ise hem üstel hem de polinom fonksiyonlarını içeren hibrit model kullanılmıştır (Eşitlik 4). Bu yaklaşımın Lei vd. (2024)'ten farkı şu şekilde ifade edilebilir; (i) farklı yükseklik katmanları için farklı polinomlar tanımlanmamıştır, (ii) doğrudan yükseklik farklarının fonksiyonlarına bağlı değildir.

$$\text{ZTD} = \text{ZTD}_g \times \exp \left(A_0 + A_1(H^3 - H_g^3) + A_2(H^2 - H_g^2) + A_3(H - H_g) \right) \quad (4)$$

Eşitlik 4 yardımıyla elde edilen her bir A_i katsayısı diğer iki yaklaşımda olduğu gibi mevsimsel etkiyi içerecek şekilde yeniden modellenerek nihai yükseklik düzeltme modelleri oluşturulmuştur.

3. Uygulama

Bu çalışma kapsamında üç farklı yaklaşım ile oluşturulan yükseklik düzeltme modellerinin doğruluğunu araştırmak amacıyla bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere çalışma alanı olarak Orta Avrupa seçilmiştir. Bu bölgenin seçilme nedeni topografik yapının nispeten daha engebesiz olması olarak ifade edilebilir. Bunun nedeni ise NWM'lerin yükseklik farklarının fazla olduğu engebeli bölgelerde daha düşük doğruluklu meteorolojik parametre sağlamasıdır (Doğan vd., 2024; Velikou vd., 2022). Bu kapsamda öncelikle, çalışma alanı için belirlenen her bir grid noktası ve farklı yükseklikler için 6 saat çözünürlüklü 3 yıllık ZTD değerleri elde edilmiştir. Bu ZTD değerleri kullanılarak üç farklı yaklaşım için Eşitlik 1, 3 ve 4 kullanılarak yükseklik düzeltme modeli katsayıları belirlenmiştir. Tablo 1'de düşey profil boyunca üç farklı yaklaşım ile her bir grid noktası için elde edilen ZTD değerlerinin minimum, maksimum ve ortalama doğrulukları gösterilmektedir. Doğruluk değerleri karesel ortalama hatalar (KOH) hesaplanarak elde edilmiştir.

Tablo 1: Grid noktaları için elde edilen yükseklik düzeltme model doğrulukları (cm)

Yaklaşım	Minimum	Maksimum	Ortalama
Üstel	1.39	2.08	1.79
Kübik	0.11	0.31	0.24
Hibrit	0.06	0.16	0.14

Tablo 1 incelendiğinde özellikle hibrit yaklaşım ile en yüksek doğruluklu modellerin elde edildiği görülebilmektedir. Ancak en düşük doğruluğa sahip üstel fonksiyon ile de en fazla 2 cm seviyelerinde model doğruluğuna ulaşılmıştır. Huang vd. (2021)'de bu değer 2.74 cm olduğundan sonuçların literatür ile uyumlu olduğu ifade edilebilir. Ancak, bu çalışma kapsamında elde edilen model doğruluğunun “iç doğruluğu” gösterdiği unutulmamalıdır.

Bir önceki bölümde de ifade edildiği üzere her üç yaklaşım için de elde edilen model katsayıları (H_s , L_i ve A_i) Eşitlik 2 yardımıyla mevsimsel etkiyi içerecek şekilde yeniden modellenmiştir. Tablo 2’de grid noktalarının mevsimsel etki dikkate alınarak oluşturulan modeller için minimum, maksimum ve ortalama doğrulukları gösterilmektedir.

Tablo 2: Grid noktaları için elde edilen mevsimsel etkiyi içeren yükseklik düzeltme model doğrulukları (cm)

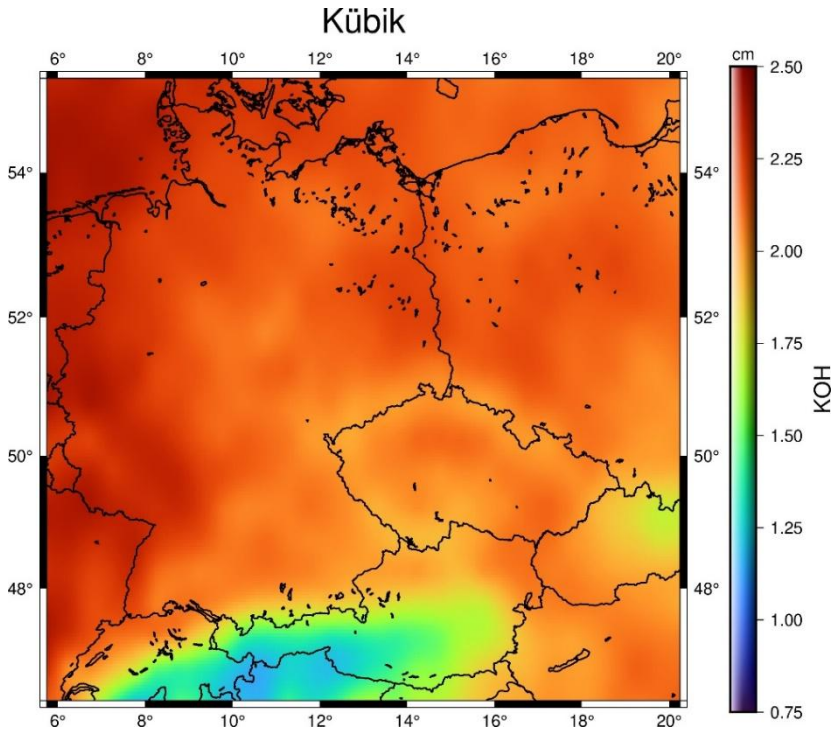
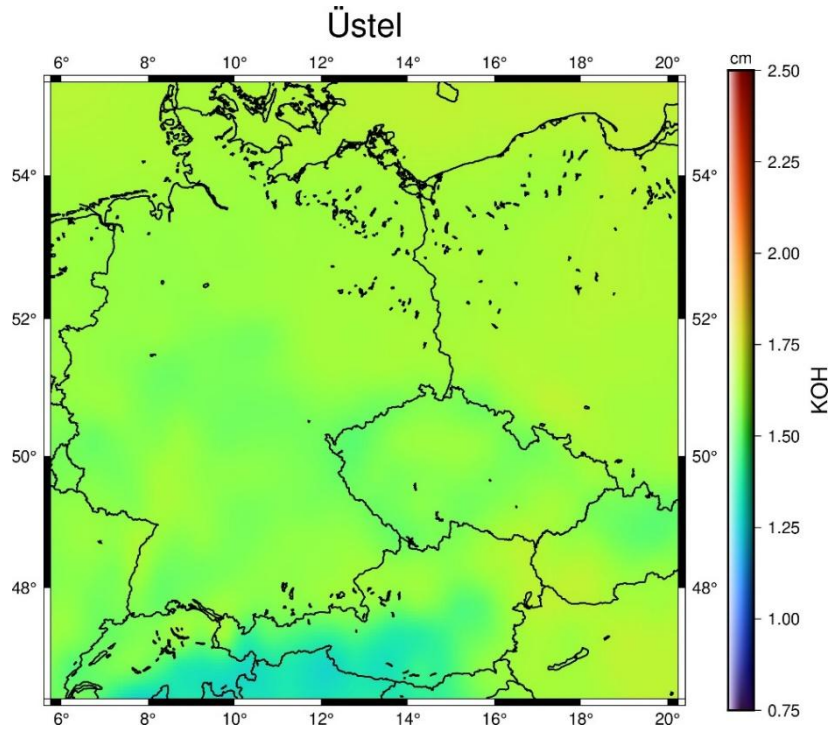
Yaklaşım	Minimum	Maksimum	Ortalama
Üstel	1.26	1.73	1.60
Kübik	1.17	2.41	2.08
Hibrit	0.82	1.23	1.09

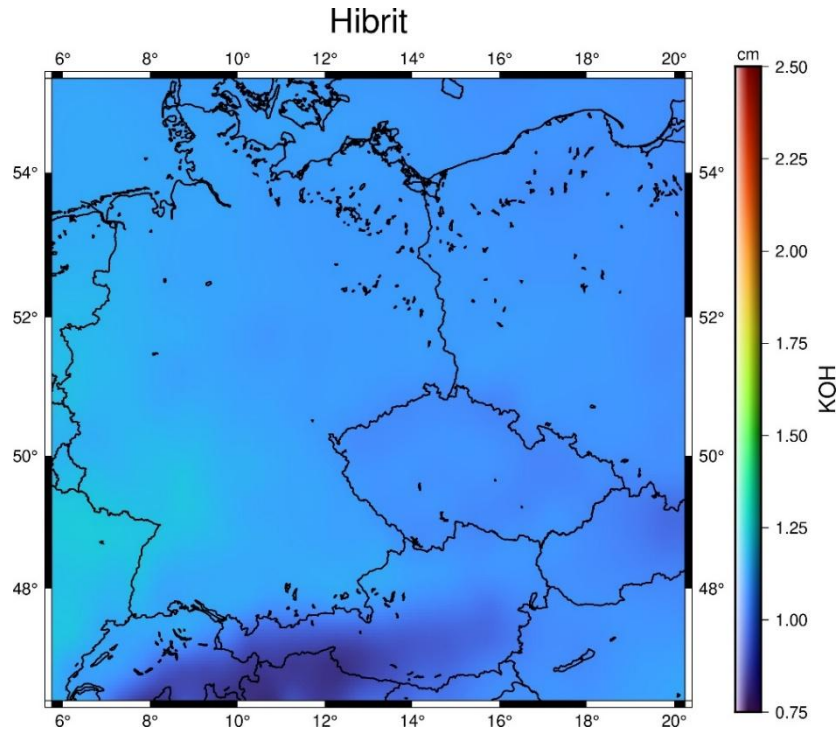
Tablo 2 incelendiğinde mevsimsel etkinin dikkate alındığı durumda üstel fonksiyon için doğruluğun arttığı, diğer iki yaklaşım için ise doğrulukların ciddi oranda düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak her ne kadar yüzdesel olarak bu değerler düşse de, kübik yaklaşım için ortalama 2 cm ve hibrit yaklaşım için 1 cm’lik doğruluklar elde edilmiştir. Tablodaki ortalama değerler incelendiğinde her üç yaklaşımın da yükseklik düzeltme modeli olarak kullanılabileceği ve literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür (Huang vd., 2021). Şekil 3, 4 ve 5’te her üç yaklaşım için grid noktalarının mevsimsel etkiyi içeren model doğrulukları gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde model doğruluklarının çalışma alanının neredeyse tamamı için benzer sonuç verdiği görülmektedir. Ancak, çalışma alanının güneyinde yer alan Alp Dağları’nın bulunduğu bölgede her üç yaklaşımda da doğruluk değerleri değişmektedir. Bu etki özellikle kübik yaklaşımda daha net görülebilmektedir. Ayrıca, şekillerin Tablo 2 ile de uyumlu olduğu ve en yüksek doğruluk değerlerinin hibrit yaklaşım ile elde edilebileceği ifade edilebilir.

Üç yaklaşım için elde edilen modeller, çalışma alanı içerisinde yer alan 532 GNSS istasyonu kullanılarak da karşılaştırılmıştır. Bu aşamada sürekli gözlem yapan GNSS istasyonları için ZTD değerleri yine DNS yazılımı ile ERA5 verileri kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra GNSS istasyonlarını içine alan gridler belirlenmiş ve ilgili grid noktaları için ZTD değerleri istasyon yükseklikleri için bu çalışma kapsamında üretilen yükseklik düzeltme modelleri yardımıyla elde edilmiştir. Son aşamada ise 4 parametrelili bir yüzey modeli (Eşitlik 5) oluşturularak istasyonlar için ZTD değerleri hesaplanmış ve doğrudan DNS ile elde edilen ZTD değerleri karşılaştırılmıştır.

$$ZTD(\varphi, \lambda) = a_0 + a_1\varphi + a_2\lambda + a_3\varphi\lambda \quad (5)$$

Burada φ ve λ sırasıyla coğrafi enlem ve boylamı ve a_i model katsayılarını ifade etmektedir.





Şekil 5: Hibrit yaklaşım için mevsimsel etkiyi içeren model doğrulukları

Tablo 3 ve 4'te GNSS istasyonları için her üç yaklaşım ile elde edilen doğruluk değerleri gösterilmektedir. Tablo 4 mevsimsel etkiyi içeren model sonuçlarını göstermektedir. Tablolar incelendiğinde ortalama doğrulukların mm mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu durumun ölçü sayısı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında hem üretilen modeller için hem de GNSS istasyonları için ERA5 verileri kullanılmıştır. Her ne kadar Tablo 3 ve 4'te yer alan doğruluk analizleri GNSS istasyonları için gerçekleştirilmiş olsa da, ZTD değerleri aynı veri seti kullanılarak elde edildiğinden yine modellerin iç doğrulukları sunulmaktadır. Tablo 3 incelendiğinde üstel ve kübik yaklaşımın benzer sonuçlar verdiği, hibrit yaklaşım ile elde edilen ortalama KOH değerlerinin ise diğer iki yöntemle göre daha büyük olduğu görülmektedir. Ancak Tablo 4'te ortalama KOH değerlerinin birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. Ancak, elde edilen modellerin radyosonda vb. bir profil verisi ile test edilmediği unutulmamalıdır.

Tablo 3: GNSS istasyonları için elde edilen yükseklik düzeltme model doğrulukları (cm)

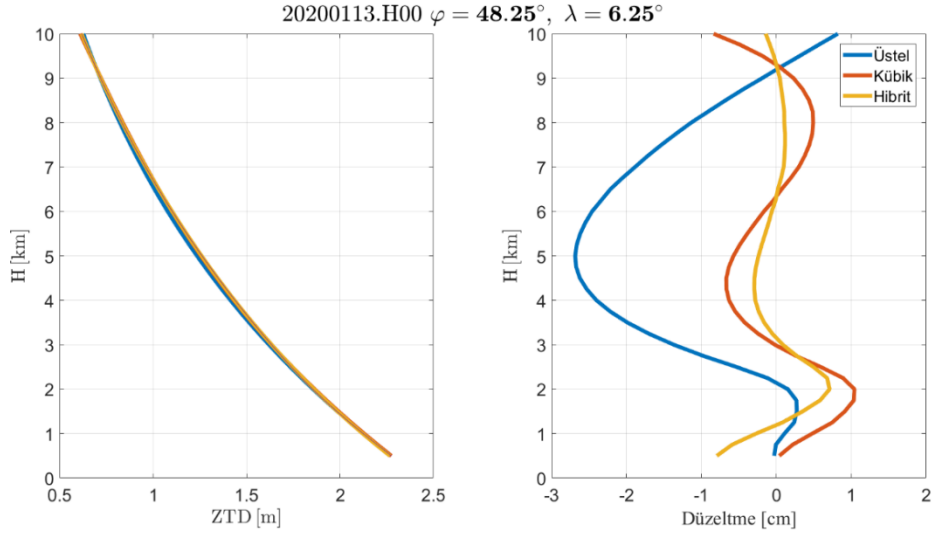
Yaklaşım	Minimum	Maksimum	Ortalama
Üstel	0.02	0.92	0.30
Kübik	0.03	0.87	0.30
Hibrit	0.19	2.06	0.70

Tablo 4: GNSS istasyonları için elde edilen mevsimsel etkiyi içeren yükseklik düzeltme model doğrulukları (cm)

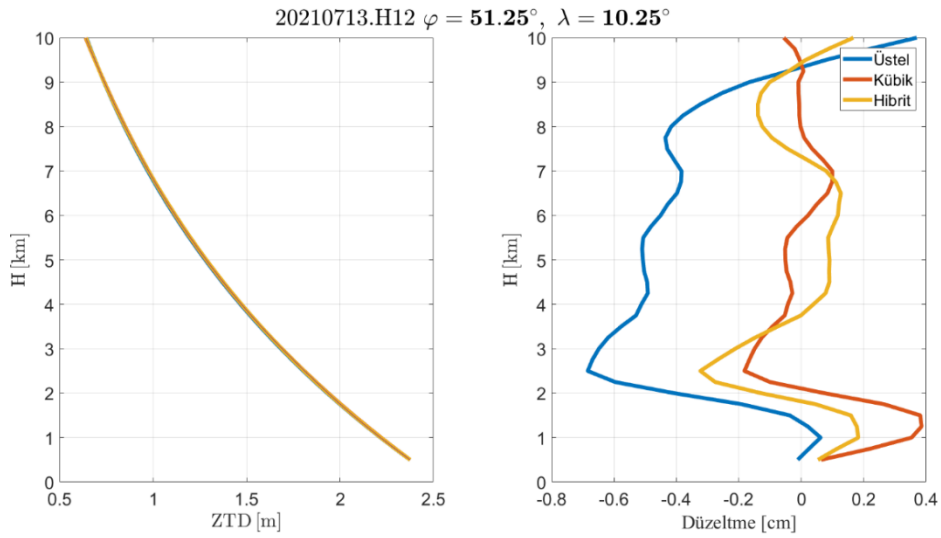
Yaklaşım	Minimum	Maksimum	Ortalama
Üstel	0.02	1.32	0.31
Kübik	0.03	0.94	0.31
Hibrit	0.10	1.49	0.36

Tablo 1 ve 2'deki model doğrulukları incelendiğinde hibrit yaklaşımın açık ara daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Ancak GNSS istasyonları için gerçekleştirilen doğruluk analizlerinde en büyük KOH değerleri her ne kadar çok küçük farklarla olsa da hibrit yaklaşım ile elde edilmiştir. Bu durumun anlaşılabilmesi için bu çalışma kapsamında üretilen modellerin düşey profil boyunca elde edilen düzeltme değerleri incelenmiştir.

Şekil 6 ve 7’de sırasıyla iki farklı gün ve iki farklı grid noktası için ZTD değerleri ve her üç yaklaşımdan elde edilen düzeltmeler gösterilmektedir. Şekil 6 ve 7 incelendiğinde üstel yaklaşımın özellikle yükseklik farkının düşük olduğu (~1.5 km) seviyelerde daha iyi sonuç verdiği, buna karşın yükseklik farkı arttıkça daha kötü sonuç verdiği görülebilmektedir. Diğer iki yaklaşımın ise yükseklik farkının düşük olduğu seviyelerde üstel yaklaşıma göre daha kötü sonuçlar ürettiği, ancak farkların yüksek olduğu seviyelerde daha iyi sonuçlar verdikleri gözlemlenmiştir. Bu iki örnek dışındaki verilerin büyük bir kısmında da özellikle hibrit yaklaşımın düşük yükseklik farklarında daha kötü sonuçlar ürettiği görülmüştür.



Şekil 6: 13 Ocak 2020 UTC 0 için ZTD ve düzeltme değerleri



Şekil 7: 13 Temmuz 2021 UTC 12 için ZTD ve düzeltme değerleri

Bu kapsamda her bir GNSS istasyonu için kullanılan grid noktaları ile aralarındaki ortalama yükseklik farkları hesaplanmış ve elde edilen KOH değerleri ile ilişkisi incelenmiştir. Bu aşamada öncelikle ortalama yükseklik farkları 100’er metrelik katmanlara ayrılmış ve ortalama KOH değerleri elde edilmiştir. Daha sonra her bir katman yüksekleri ile ortalama KOH değerlerinin korelasyon değerleri elde edilmiştir. Üstel, kübik ve hibrit yaklaşım için korelasyon değerleri sırasıyla 0.90, 0.96 ve 0.86 olarak elde edilmiştir. Burada yüksek korelasyon değeri aslında yükseklik farkı arttıkça doğruluğun düştüğünü göstermektedir. 0.86 ile en düşük korelasyon değeri hibrit yaklaşım ile elde edilmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak hibrit yaklaşımın diğer iki yaklaşıma göre yükseklik farkına daha az duyarlı olduğu ifade edilebilir. En yüksek korelasyon değerinin kübik yaklaşım ile elde edilmesi ise yine yükseklik farkları ile açıklanabilir. Çalışma alanındaki maksimum yükseklik farkı

yaklaşık 1200 metredir. Daha önce de ifade edildiği gibi üstel yaklaşım ~ 1.5 km seviyelerine kadar daha iyi sonuçlar vermektedir. Çalışma alanının nispeten daha az engebeli olduğu göz önüne alındığında hibrit yaklaşımın GNSS istasyonları için gerçekleştirilen analizlerde neden daha kötü sonuç verdiği anlaşılabilmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında farklı ZTD yükseklik düzeltme modellerinin etkisi incelenmiştir. Çalışma alanı olarak Orta Avrupa belirlenmiş ve ECMWF'nin ERA5 verileri kullanılarak 0.50° grid aralığındaki noktalar için 3 yıllık 6 saatlik çözünürlükteki çözümleri gerçekleştirilmiştir. Yükseklik düzeltme modellerinin oluşturulabilmesi için düşey profil verisi gerektiğinden her bir grid noktası için 10 km'ye kadar farklı yükseklikler tanımlanmış ve DNS yazılımı kullanılarak ZTD değerleri elde edilmiştir. Üstel, kübik ve hibrit yaklaşım olmak üzere üç farklı yaklaşım ile düzeltme modelleri/model katsayıları belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada bu model katsayıları mevsimsel etkiyi içerecek şekilde yeniden modellenmiştir. Üç farklı yaklaşım öncelikle model doğrulukları göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Burada hem mevsimsel etkinin dikkate alındığı hem de alınmadığı durumda en iyi sonuçların hibrit yaklaşım ile elde edildiği görülmüştür. Daha sonra üretilen modeller çalışma alanı içerisinde yer alan ve yine DNS yazılımı ile ZTD değerleri elde edilen GNSS istasyonları için analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda KOH değerlerinin mm mertebesinde olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin fazla ölçü sayısı ile ilişkili olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, GNSS istasyonları için en düşük doğruluğun hibrit yaklaşım ile elde edildiği gözlemlenmiştir. En yüksek model doğruluğuna hibrit yaklaşım sahip olduğundan bu etkinin nedeninin araştırılması gerektiği belirtilmiş ve her üç yaklaşım ile düşey profil boyunca hesaplanan düzeltmeler incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda hibrit yaklaşımın özellikle düşük yükseklik farklarında daha kötü sonuç verdiği belirtilmiştir. Çalışma alanı nispeten engebesiz bir topografyaya sahip olduğundan bu etkinin yükseklik farkları ile ilişkili olabileceği ifade edilmiştir. Bu kapsamda yükseklik farkları ve KOH değerleri arasındaki korelasyon değerleri hesaplanmıştır. En düşük korelasyon değerine sahip hibrit yaklaşımın yükseklik farkına daha az duyarlı olduğu vurgulanmıştır. Karşılaştırma ve analizler sonucunda, bu çalışma alanı için her üç yaklaşımın da benzer sonuçlar verdiği ve üç yaklaşımın da kullanılabileceği görülmektedir. Ayrıca en düşük korelasyon değeri ile yükseklik farkına daha az duyarlı olan hibrit yaklaşımın özellikle yükseklik farklarının fazla olduğu bölgelerde daha iyi sonuç verebileceği ve araştırılması gerektiği düşünülmektedir. Bu kapsamda gelecekteki çalışmalarda bu modellerin yükseklik farklarının fazla olduğu Türkiye için de araştırılması planlanmaktadır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler sadece ERA5 verilerine dayalı olarak yapılmıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar aslında “iç doğruluğu” göstermektedir. Bu nedenle gelecek çalışmalarda üretilecek modellerin radyosonda gibi düşey profil verileri ile karşılaştırma analizlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Şekil 1, 3, 4 ve 5 GMT (Generic Mapping Tools) kullanılarak çizilmiştir (Wessel & Smith, 1998).

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Kaynaklar

Askne, J., & Nordius, H. (1987). Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio science*, 22(03), 379-386.

- Böhm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81(10), 679-683.
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio science*, 20(6), 1593-1607.
- Doğan, A. H., Zus, F., Dick, G., Wickert, J., Schuh, H., Durdağ, U. M., & Erdoğan, B. (2024). Improving the wet mapping function by numerical weather models. *Advances in Space Research*, 73(1), 404-413.
- Doğan, A. H. (2026). Investigation of the GFS forecast products on RT-PPP solutions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 280, 106755.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 146(730), 1999-2049.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Vienna: Springer Vienna.
- Huang, L., Zhu, G., Liu, L., Chen, H., & Jiang, W. (2021). A global grid model for the correction of the vertical zenith total delay based on a sliding window algorithm. *GPS Solutions*, 25(3), 98.
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., & Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical research letters*, 40(6), 1069-1073.
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360.
- Lei, X., Xu, X., Tao, J., Yang, T., Zhao, Q., & Guo, J. (2024). High-precision tropospheric correction method for NRTK regions with significant height differences. *Measurement Science and Technology*, 35(10), 106315.
- Li, H., Zhu, G., Kang, Q., Huang, L., & Wang, H. (2023). A global zenith tropospheric delay model with ERA5 and GNSS-based ZTD difference correction. *GPS Solutions*, 27(3), 154.
- Lin, L. S. (1997). *Real-time estimation of ionospheric delay using GPS measurements* (Doktora Tezi). The University of New South Wales, School of Geomatic Engineering, Sidney, Avusturalya.
- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, 15, 247-251.
- Song, S., Zhu, W., Chen, Q., & Liou, Y. (2011). Establishment of a new tropospheric delay correction model over China area. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 54(12), 2271-2283.
- Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., & Anagnostopoulou, C. (2022). Reliability of the ERA5 in replicating mean and extreme temperatures across Europe. *Water*, 14(4), 543.
- Wang, X., Zhu, G., Huang, L., Wang, H., Yang, Y., Li, J., Huang, L., Zhou, L., & Liu, L. (2022). Development of a ZTD vertical profile model considering the spatiotemporal variation of height scale factor with different reanalysis products in China. *Atmosphere*, 13(9), 1469.
- Wang, J., Chen, J., & Zhang, Y. (2025). Empirical modeling of tropospheric delays with uncertainty. *Geoscientific Model Development*, 18(5), 1487-1504.
- Wessel, P., & Smith, W. H. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47), 579-579.
- Wilgan, K., Hadas, T., Hordyniec, P., & Bosy, J. (2017). Real-time precise point positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model. *GPS solutions*, 21(3), 1341-1353.
- Zheng, F., Lou, Y., Gu, S., Gong, X., & Shi, C. (2018). Modeling tropospheric wet delays with national GNSS reference network in China for BeiDou precise point positioning. *Journal of Geodesy*, 92(5), 545-560.
- Zus, F., Balidakis, K., Dick, G., Wilgan, K., & Wickert, J. (2021). Impact of tropospheric mismodelling in GNSS precise point positioning: A simulation study utilizing ray-traced tropospheric delays from a high-resolution NWM. *Remote Sensing*, 13(19), 3944.
- Zus, F., Balidakis, K., Doğan, A. H., Thundathil, R., Dick, G., & Wickert, J. (2025). DNS (v1. 0): An open source ray-tracing tool for space geodetic techniques. *Geoscientific Model Development*, 18(15), 4951-4964.