

Sabit GNSS İstasyonlarının IGS-REPRO3 Ürünleri, Güncel Model ve Veri Analiz Stratejileri Kullanılarak Çoklu GNSS Analizleri

(Multi-GNSS Analysis of Permanent GNSS Stations Using IGS-REPRO3 Products, Latest Models, and Data Analysis Strategies)

Mert SAĞLAM¹, Özgür ÖZEL², Bahadır AKTUĞ³

¹Harita Genel Müdürlüğü, Kartografya Dairesi, Cebeci, Ankara

²Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Dairesi, Cebeci, Ankara

³Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle, Ankara

mert.saglam@harita.gov.tr, ozgur.ozel@harita.gov.tr, aktug@ankara.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 10.12.2024

Kabul Tarihi (Accepted): 15.07.2025

ÖZ

Uluslararası ölçekte yüksek hassasiyetli veriler sağlayan Uluslararası GNSS Servisi (IGS) istasyonları, küresel jeodezik referans çerçevesinin sürekliliği ve doğruluğu açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Ancak bu katkının sürdürülebilirliği için, elde edilen verilerin en güncel yörünge bilgileri, atmosferik modeller ve analiz stratejileriyle yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada; Türkiye ve çevresindeki Sabit Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) istasyonlarının 2018-2023 yılları arasındaki GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu sistemlerinin ham gözlem verileri ile, IGS tarafından sunulan Repro3 (ReProcessing 3) ürünleri ile yeniden işlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda güncellenen REPRO3 ürünleri kullanılarak daha tutarlı zaman serilerinin ve nokta hızlarının elde edilmesi hedeflenerek Çoklu-GNSS sistemlerinin koordinat doğrulukları değerlendirilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde GAMIT/GLOBK V10.71 yazılımı kullanılmış ve nihai çözümler ITRF2020 referans sisteminde hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, Çoklu-GNSS sistemlerinin dahil edildiği çözümlerin performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: GNSS, IGS, Repro3, Yeniden İşleme.

ABSTRACT

International GNSS Service (IGS) stations, which provide high-precision data on an international scale, play a critical role in the continuity and accuracy of the global geodetic reference framework. However, for the sustainability of this contribution, it is necessary to re-evaluate the acquired data with the latest orbital information, atmospheric models and analysis strategies. In this study, it is aimed to reprocess the raw observation data of GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou satellite systems between 2018 and 2023 of the Geostationary Global Navigation Satellite System (GNSS) stations in and around Türkiye with the Repro3 (ReProcessing 3) products offered by IGS. In this context, the coordinate accuracies of multi-GNSS systems were evaluated with the aim of obtaining more consistent time series and point velocities using the updated REPRO3 products. GAMIT/GLOBK V10.71 software was used to evaluate the data and the final solutions were calculated in the ITRF2020 reference system. The results obtained from the study show that

the inclusion of Multi-GNSS systems improves the performance of the solutions.

Keywords: GNSS, IGS, Repro3, Reprocessing

1. GİRİŞ

Konum belirleme ve zaman senkronizasyonu, insanlık için önemli ihtiyaçlardandır. Uydu tabanlı konum ve navigasyon sistemlerindeki hızlı gelişmeler, gerçek zamanlı olarak üç boyutlu konum, hız ve zaman bilgisinin elde edilmesini sağlamış ve bu alandaki uygulamaları artırmıştır. Tarihsel süreçte gök cisimlerine dayalı yön bulma yöntemleri kullanılmakta iken, günümüzde uydu tabanlı sistemler, sundukları yüksek doğruluk ve sürekli kullanılabilirlik ile bu yöntemlerin yerini almıştır. Uydu sistemlerinin başlangıcı, Sovyetler Birliği'nin Sputnik uydusunun yörüngeye yerleştirilmesiyle başlamıştır. Ancak Sputnik uydusu özellikle navigasyon amacıyla tasarlanmamış, daha çok izleme ve uzay araştırmaları için kullanılmıştır. Bu gelişme, uydu teknolojilerinin ilerlemesi ve yörünge izleme yöntemlerinin temellerinin atılmasına katkı sağlamıştır. Ardından ABD tarafından geliştirilen GPS sistemi, bu alanda yeni bir dönemin kapılarını açmıştır. Sonraki yıllarda, Rusya'nın GLONASS, Avrupa'nın Galileo ve Çin'in BeiDou sistemlerinin devreye girmesiyle birlikte çoklu GNSS (Global Navigation Satellite Systems) konsepti ortaya çıkmıştır. Birden fazla navigasyon sisteminin entegrasyonu, konum, zaman ve navigasyon uygulamalarında uydu kaybı durumlarında alternatif sinyaller sunarak hem kullanılabilirliği hem de doğruluğu artırmaktadır. (Bahadır ve Nohutcu, 2018).

GNSS, kara, deniz ve hava araçlarının navigasyonunda, arama-kurtarma işlemlerinde ve uçakların zorlu hava koşullarında iniş ve kalkışlarında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, jeodezik ölçümler, araç takip sistemleri ve coğrafi bilgi sistemleri gibi birçok sivil alanda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, GNSS uydu yörüngeleri ve yer dönme parametrelerinin

doğruluğunu artırmak amacıyla, global analiz merkezleri gelişen modeller ve teknolojiler doğrultusunda düzenli olarak güncellemeler yapmaktadır. Bu bağlamda REPRO3 projesi, çoklu GNSS veri analizi ve modelleme konusunda önemli bir adım olmuştur. Ekim 2019 itibarıyla, IGS Analiz Merkezleri, IGS küresel ağı tarafından 1994-2019 yılları arasında toplanan GNSS verilerini, en son modeller ve metodolojilerle tamamen tutarlı bir şekilde üçüncü kez yeniden analiz etmiştir (International GNSS Service, 2019). Bu çalışmada ise, Türkiye ve çevresindeki sabit GNSS istasyonlarından elde edilen 2018-2023 yıllarına ait veriler, REPRO3 ürünleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çoklu GNSS çözümleri değerlendirilmiş ve bu analizlerin doğruluğu incelenmiştir.

Bu çalışma, yalnızca REPRO3 ürünleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, güncel modeller ile Çoklu-GNSS verileri analiz edilmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

a. Yeniden İşlemede Kullanılacak olan IGS İstasyonlarının Seçilmesi

Çalışma kapsamında referans çerçevesini tanımlamak amacıyla 2018-2023 yılları arasında, önceki tecrübeler dikkate alınarak yeniden işlemede kullanılacak olan Türkiye ve çevresindeki 24 adet IGS istasyonu dikkatli bir şekilde seçilerek ağ çözümlerine dahil edilmiştir. Çalışmanın amacına uygun olarak bu istasyonların hepsi GPS, Galileo, BeiDou ve GLONASS uydularına ait gözlemleri toplayabilen GNSS alıcılarına sahiptir. İstasyonların seçiminde, ilgili istasyonların coğrafi konumları da göz önünde bulundurulmuştur. İlgili IGS istasyonlarının coğrafi konumları Şekil 1'de sunulmuştur.

b. Yeniden İşlemede Kullanılan Modeller

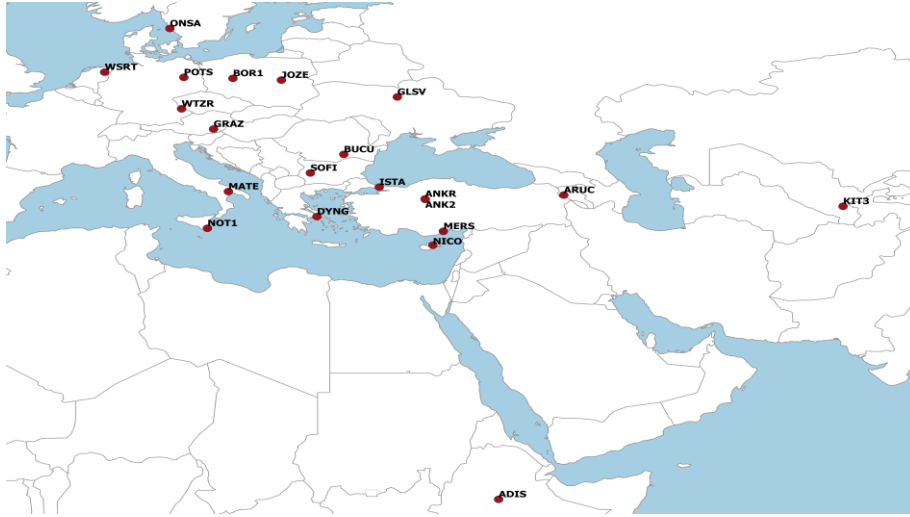
Dinamik yörünge belirleme stratejisi, uyduya etki eden matematiksel bir dış kuvvet modeli kullanarak uydunun zamana bağlı hızlanma değişikliklerini tahmin eder ve GNSS ölçmeleri için en uygun yörünge geliştirilir (Üstüner, 2019). Buna göre Tablo 1'de yer alan kuvvet modellerin seçimi, her bir fiziksel etkinin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak ve uydunun yörünge çözümünün hassasiyetini artırmak amacıyla yapılmaktadır. Bu model, güneş, ay ve gezegenlerin yerçekimi etkilerini dikkate alarak, uydunun yörüngesindeki uzun dönemli ve kısa dönemli etkileri modellemekte başarılıdır (Folkner, Williams ve Boggs, 2014).

Tablo 1. Uydu yörünge entegrasyonunda kullanılan kuvvet modelleri

Etki	Kullanılan Model
Astronomik Gelgitler	JPL DE435
Katı Yer Gelgiti	IERS 2010
Kutup Gelgiti	IERS 2010
Okyanus Kutup Gelgit Yükleme	IERS 2010
Genel Görelilik	IERS 2010
Güneş Radyasyon Basıncı	ECOM1 Box-wing
Dünya Radyasyon Basıncı	ECOM1 Box-wing
Okyanus Gelgit Yükleme	FES2014b

Güneş'in büyük kütlesi ve Ay'ın yakınlığı nedeniyle, Güneş ve Ay başlıca gelgit etkilerini yaratan iki ana kaynaktır. Diğer gezegenlerin etkisi çok daha küçük olmakla birlikte, yine de önemli olabilir. Üçüncü cisimlerin çekim etkisi, zamanla değişen karşılıklı geometrilere bağlı olarak değişir (Mayer-Gürr, Wieser, Schardt ve Scholz, 2022).

IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service-Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi) 2010 modelinin kullanıldığı bu çalışmada, katı yer gelgiti ve kutup gelgiti, Dünya'nın kütle merkezi ve eksenel hareketindeki değişimleri dikkate alan temel modellerdir. IERS tarafından yayımlanan 2010 konvansiyonları, bu etkilerin hesaplanması için standart bir referans sunmaktadır (Petit ve Luzum, 2010). Katı yer gelgiti, Dünya'nın dönme eksenindeki kaymaların sebep olduğu yüzey yer değiştirmelerini kapsarken, okyanus gelgit yüklemesi, okyanusların kütle dağılımının Dünya'nın dönme hareketi üzerindeki etkilerini modellemektedir.



Şekil 1. Yeniden İşleme 3'te kullanılan IGS istasyonları

Güneş radyasyon basıncı modellemesinde kullanılan ECOM1 Box-wing modeli, güneşten gelen elektromanyetik radyasyonun uydular üzerindeki etkisini modellemek için geliştirilmiştir. Bu model, uydu geometrisi ve malzeme özelliklerini hesaba katarak, güneş ışığından kaynaklanan basıncı simüle eder. Yörünge tahminlerinde bu tür etkilerin doğru modellenmesi, özellikle yüksek yörüngeli GNSS uydularında kritik bir rol oynar (Rodriguez-Solano, Hugentobler, Steigenberger, Bloßfeld ve Fritsche, 2014).

Okyanus gelgit yüklemesinde kullanılan FES2014b (Carrere, Lyard, Cancet ve Guillot, 2015) modeli, okyanusların kütle dağılımının uydu yörüngesi üzerindeki etkilerini hesaba katar. Okyanus gelgit yüklemesi deniz tabanında ve ona bitişik olan karada okyanus gel-gitleri nedeniyle oluşan harekete karşılık oluşan deformasyondur (Witchayangkoon, 2000). Bu model, gelgit hareketleri ve okyanus dinamiği kaynaklı kütle değişimlerinin, uydu yörüngelerine olan etkilerini yüksek doğrulukla düzeltir (Lyard, 2021). Bu düzeltmeler, özellikle deniz seviyesi araştırmaları ve hassas GNSS analizleri için hayati önem taşımaktadır.

Modellenen gözlemler kapsamında, GNSS ile konum belirleme sürecinde kullanılan matematiksel model, ikili farklar yöntemiyle oluşturulduğunda uydu ve alıcı saat hatalarının giderilmesi sağlanabilmekte; ayrıca kısa bazlarda uydu yörünge hataları, atmosferik etkiler ve yansıma hatalarının etkileri önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Hofmann-Wellenhop, Lichtenegger ve Wasle, 2007).

Uydu Yörüngeleri, CODE (Center for Orbit Determination in Europe) tarafından sağlanan

final yörünge verileri, GNSS uydu hareketlerinin yüksek doğrulukla tahmin edilmesi ve GNSS analizlerinin doğruluğu açısından analizlerde bir parametre olarak kullanılmıştır.

GNSS verisi analiz sürecinde, GAMIT/GLOBK V10.71 (Herring, King, Floyd ve McClusky, 2018) yazılımı, verilerin global ve bölgesel referans çerçeveleriyle uyumunu sağlamak için stabilizasyon ve dönüşüm parametrelerini hesaplar. Dönüşüm işleminde ise farklı referans çerçeveleri arasındaki uyum, 12 parametrelili Helmert dönüşümü (3 öteleme, 3 dönüklük, 3 öteleme hızı, 3 dönüklük hızı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

USNO Bull B (United States Naval Observatory Bulletin B), ABD Donanması Gözlemevi tarafından yayımlanan ve Yer Dönme Parametrelerini içeren bir veri tabanıdır. Bu parametreler, Dünya'nın dönüş hareketini ve bu hareketin zamanla değişimini belirler. Yer dönmesi, GNSS sinyalleri üzerinde önemli etkilere yol açabileceği için, bu parametreler, özellikle hassas konum belirleme ve zaman senkronizasyonu işlemlerinde kullanılır. USNO Bull B, GNSS analizlerinde doğru yer dönmesi modellemesi yapabilmek için gerekli olan bu parametreleri sağlar ve doğruluğu artırmak amacıyla kullanılır.

Troposferik İndirgeme Fonksiyonu olan Vienna İzdüşüm Fonksiyonu, troposferin uydu sinyalleri üzerindeki etkilerini, kuru ve ıslak bileşenleri göz önüne alarak modellemektedir. Bu çalışmada ise kuru ve ıslak zenit gecikmesi için VMF1 kullanılmıştır (Boehm, Werl ve Schuh, 2006).

Tablo 2. Uydu yörünge hesaplamasında kullanılan modeller

Etki	Kullanılan Model
Modellenen Gözlemler	Çift Farklar
En Düşük Uydu Yükseklik Açısı (cut-off angle)	3 derece
Uydu Yörüngeleri	CODE
Yer Dönme Parametreleri	USNO bull_b
Troposferik İndirgeme Fonksiyonu	VMF1 (Kuru ve ıslak bileşenler için)
Troposferik Öncül Veri Kaynağı	gpt3_1.grd (Global basınç sıcaklık)
Troposferik Parametre Kestirim Aralığı	2 saat
Okyanus Gelgit Yükleme	FES2014b
Atmosferik Yükleme Etkisi (non-tidal loading)	vmfapInt_cm.YYYY (grid dosya)
Atmosferik Yükleme Etkisi (tidal loading)	s1_s2_s3_cm_noib_grid.atl
Manyetik Model	IGRF13 modeli
Kullanılan IGS İstasyon Sayısı	24 İstasyon
Anten Faz Merkezi Düzeltmeleri	Mutlak (IGS20 modeli)
Öncül Koordinatlar	ITRF2020
Stabilizasyon	Bölgesel
Dönüşüm	12 Parametrelili
Referans Çerçevesi	ITRF2020
Dünya Radyasyon Basıncı	ECOM1 Box-wing
Yarı Günlük Yer Dönme Modeli	Desai ve Sibois/Egbert
Dünya Albedo Modeli	C.Rodriguez – Solano

Öncül troposferik parametrelerin belirlenmesinde, 1 x 1 derece çözünürlüğe sahip ve grid yapısında olan gpt3_1.grd dosyası kullanılmıştır (Landskron ve Böhm, 2018). Bu dosya, dünya genelinde basınç, sıcaklık (yüksekliğe bağlı değişimler dâhil) ve su buharı basıncı gibi atmosferik parametrelerin yıllık değişimlerini içeren katsayıları içermektedir. Troposferik parametrelerin kestirim aralığı 2 saat olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, ikinci ve üçüncü derece iyonosferik düzeltmelerin çözümü katkısı oldukça küçük olduğu için analize dahil edilmemiştir.

En düşük uydu yükseklik açısı sınırı, GNSS sinyallerinin atmosferik etkilerden, özellikle troposfer ve iyonosferden kaynaklanan hatalardan daha az etkilenmesini sağlamak amacıyla sinyallerin atmosferik kırınım ve çok yollu (multipath) etkilerine daha az maruz kalması için 3 derece olarak seçilmiştir. Bu sayede, ufuk çizgisine yakın sinyallerin olumsuz atmosferik etkileri filtrelenerek analiz sonuçlarının doğruluğu artırılmaktadır.

Okyanus hareketlerinin GNSS sinyalleri üzerindeki etkilerini gidermek amacıyla FES2014b modeli kullanılmaktadır. Bu modelleme, okyanus

yüklemelerinin analiz sonuçlarına olumsuz etkisini azaltır.

Atmosferik Yükleme Etkisini minimize etmek amacıyla atmosferin basınç hareketlerinden kaynaklanan yüklenme etkileri, gelgit olmayan yükleme (non-tidal loading-vmfapInt_cm.YYYY) ve gelgitsel olan yükleme (tidal loading - s1_s2_s3_cm_noib_grid.atl) modelleri kullanılarak hesaplanmakta ve bu etkiler analiz sürecinde düzeltilmektedir. Bu sayede, atmosferik yüklemenin neden olduğu sinyal bozulmaları minimize edilir (Massachusetts Institute of Technology, 2024).

GNSS sinyallerinin Dünya'nın manyetik alanından etkilenmemesi için IGRF13 manyetik modeli kullanılmıştır. IGRF13 modeli, Dünya'nın manyetik alanını modelleyerek, manyetik alanın GNSS sinyallerine ve analizlerine etkilerini göz önünde bulundurur ve dolayısıyla bu tür etkilerin daha doğru bir şekilde hesaplanmasına yardımcı olur (Alken, Beggan, Finlay ve Maus, 2021).

GNSS antenlerinin faz merkezi doğrulamaları, IGS20 modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede, anten kaynaklı faz hatalarının analiz sürecine etkisi azaltılmaktadır.

GNSS analizlerinde kullanılan öncül koordinatlar ve referans çerçevesi olarak ITRF2020 (Altamimi, Rebischung, Collilieux, Métivier ve Chanard, 2023) kullanılarak, analiz sonuçlarının dünya çapında tanımlı ve uyumlu hale getirilmesi sağlanmıştır.

Yarı Günlük Yer Dönme Modelleri, Dünya'nın albedo etkisi ve yarı günlük rotasyon değişikliklerinin GNSS sinyalleri üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla uygulanmaktadır. Bu modeller, GNSS analizlerinde daha yüksek doğruluk sağlamak için önemli bir katkı sunmaktadır (Desai, Sibois ve Egbert, 2020).

Bu çalışmanın temel amacı, sabit GNSS istasyonlarının verilerini kullanarak IGS-REPRO3 ürünleriyle güncel model ve veri analiz stratejilerini birleştirerek çoklu GNSS performansını değerlendirmektir. Çalışmada, sabit GNSS istasyonlarından elde edilen veriler ile entegre edilen kuvvet modelleriyle analiz edilmiş ve farklı GNSS sistemlerinin koordinat belirleme süreçlerindeki etkileri incelenmiştir. REPRO3 analiz sürecinde kullanılan GNSS modelleri ve parametreler, Tablo 2'de detaylı şekilde sunulmuş olup, bu seçimler yüksek hassasiyetli analizler hedeflenerek yapılmıştır.

3. UYGULAMA ve DEĞERLENDİRME

Sabit GNSS istasyonlarından toplanan veriler, GNSS konum belirleme doğruluğunu artırmak amacıyla kapsamlı bir yeniden işleme sürecinden geçirilmiştir. Analiz sürecinde GAMIT/GLOBK V10.71 (Herring ve diğerleri, 2018) yazılımı kullanılarak, ham verilerin işlenmesi, verilerin dengelenmesi ve nihai konum ile hızların hesaplanması gibi aşamalar uygulanmıştır. Bu süreç, sabit GNSS istasyonlarından elde edilen verilerin Çoklu GNSS analizleriyle değerlendirilmesine de olanak sağlamıştır. Çalışma, Türkiye ve çevresindeki sabit IGS istasyonlarından 2018-2023 yılları arasında toplanan veriler, IGS-REPRO3 ürünleri kullanılarak Çoklu-GNSS sistemlerinin koordinat doğruluğunu değerlendirmeyi ve bu sistemlerin GNSS analizlerindeki katkılarını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

a. Veri Hazırlığı ve Günlük Çözümlerin Kontrolü

Çalışmada, GNSS verilerinin analizi için gerekli dosya dizinleri oluşturulmuş ve RINEX verileri günlük olarak düzenlenmiştir. GAMIT yazılımı ile farklı GNSS sistemlerine ait günlük çözüm dosyaları hazırlanmıştır. Çözümler, kullanılan istasyon sayısı, koordinatların RMS (Root Mean

Square) değerleri ve faz belirsizliği oranları dikkate alınarak kalite kontrolünden geçirilmiştir. Şartları sağlamayan dosyalar yeniden işlenerek analize uygun hale getirilmeye çalışılmıştır. Yeniden işlendiği halde analize dahil olmayan istasyonun verisi ilgili gün çözümünden çıkarılmıştır.

b. Zaman Serilerinden Kaba Hatalı Verilerin Ayıklanması

Koordinat zaman serisi analizleri ve kaba hatalı noktaların düzeltilmesi süreci, GAMIT yazılımı ile elde edilen veriler ve MATLAB ortamında çalışan TSView programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Herring, 2003). TSView, MATLAB platformunda koordinat zaman serisi analizlerinin yapılmasına olanak tanır. Bu program, GNSS koordinat zaman serilerini görselleştirmek ve kaba hatalı noktaları tespit edip düzeltmek amacıyla kullanılmıştır. Aşağıda ise bu sürecin adımları detaylandırılmaktadır:

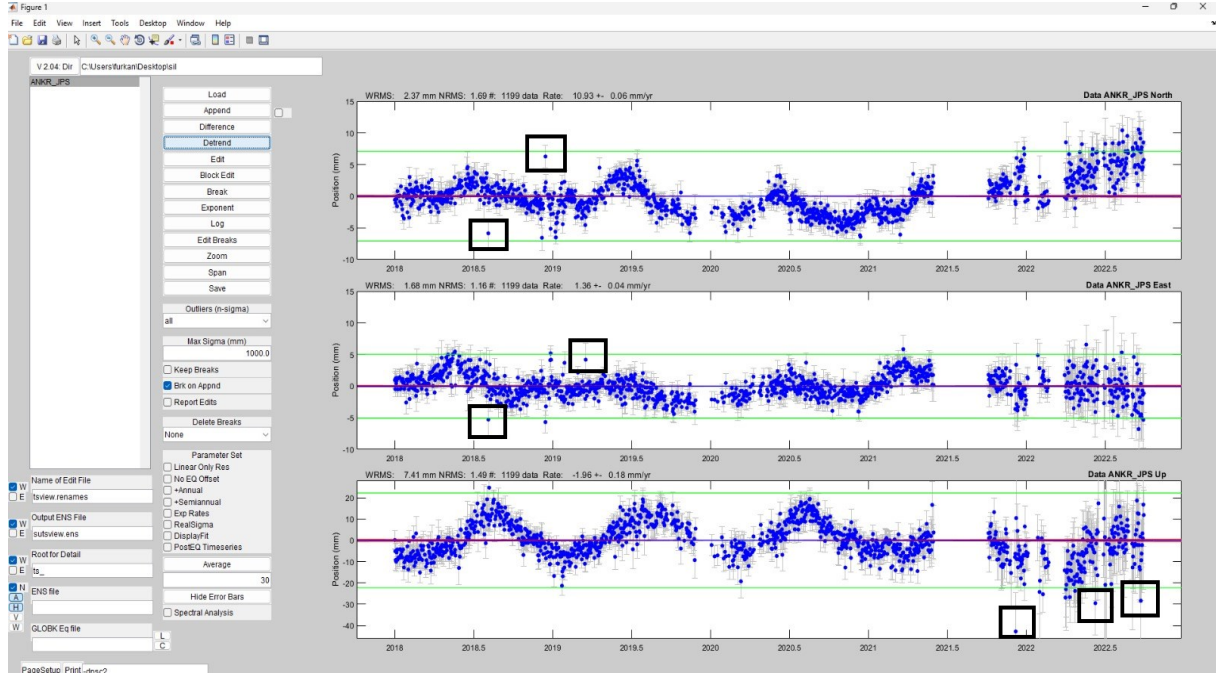
Verilerin Hazırlanması ve Kontrolü: Öncelikle, mb (multibase) dosyaları; gözlem epoklarını, Kuzey (North), Doğu (East) ve Yukarı (Up) koordinat bileşenlerini ve bu bileşenlere ait standart sapmaları içermektedir. Bu mb dosyaları, MATLAB'in TSView programı kullanılarak incelenmiştir. Bu program aracılığıyla, verilerdeki kaba hatalı noktalar görsel olarak tespit edilmiş ve hatalı günler belirlenmiştir. Örnek olarak, Şekil 2'de TSView kullanılarak hatalı günlerin seçilme aşaması gösterilmektedir.

Hatalı Verilerin Düzeltilmesi: Tespit edilen hatalı noktaların hangi günlere ait olduğu belirlendikten sonra, bu günler düzenlenir. Hatalı veriler, çözüm sürecine dahil edilmemek üzere işaretlenir ve bu noktalar sonraki analizlerde dikkate alınmaz. Bu tür veriler, koordinat ve hız hesaplamalarındaki doğruluğu olumsuz yönde etkileyebileceğinden, kaba hata oluşturan veriler çözüme dahil edilmez.

c. Aylık Birleştirmeler

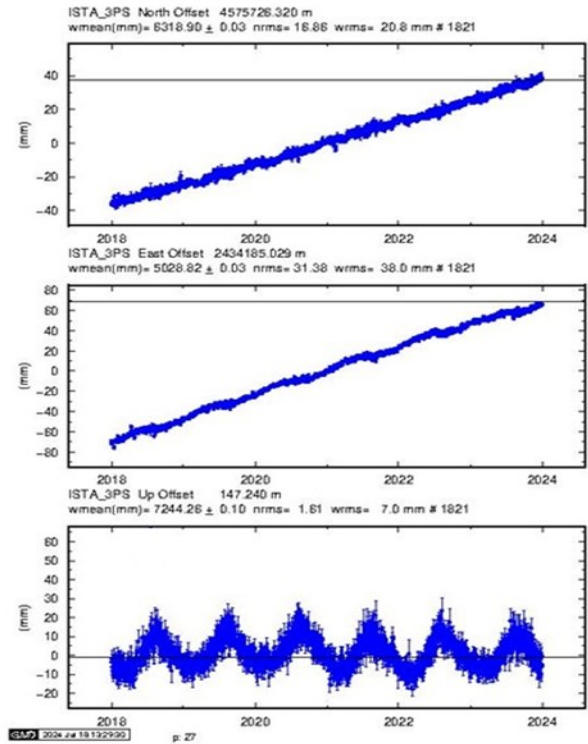
Günlük analizlerin yerine aylık analizlerin tercih edilmesi, genellikle stabil sonuçlar elde etmek için gereklidir. Aylık çözüm, veri hatalarının etkisini azaltır, hesaplama süresini optimize eder. Bu nedenlerle oluşturulan günlük çözümler, Tablo 3'te belirtilen GNSS sistem kombinasyonlarına göre birleştirilmiş ve aylık çözümler elde edilmiştir.

GAMIT/GLOBK V10.71 (Herring ve diğerleri, 2018) yazılımını kullanarak, 2018-2023 yılları arasındaki verilerin aylık zaman serileri oluşturulmuştur.



Şekil 2. TSVIEW kullanılarak hatalı günlerin seçilme aşaması

2018 yılının 1. gününden (01 Ocak 2018) 2023 yılının 365. gününe (31 Aralık 2023) kadar olan veriler kullanılarak, 24 Adet sabit GNSS istasyonunun (IGS Ağında yer alan ve çözüme dahil edilen tüm istasyonlar) aylık çözümleri birlikte dengelenerek sonuç çözümler elde edilmiştir. Kampanya çözümlerinin birlikte dengelenmesinde GLOBK (Global Kalman Filtreleme) modülü kullanılmıştır. GLOBK, farklı yazılımlarla oluşturulmuş çözümleri Kalman Filtreleme tekniği ile istenilen bir referans koordinat sisteminde birleştirilmesini sağlayan, nokta koordinat zaman serilerini oluşturan ve sonuç hızları hesaplayan bir modüldür (Kurt ve diğerleri, 2020). GLOBK çözümünün ilk aşamasında noktalara yüksek öncül varyans tanımlanarak Kalman Filtreleme Tekniği kullanılarak elde edilmiştir (Herring ve diğerleri, 2018). ITRF2020 datumunda tanımlı olan koordinat ve hız bilgileri 12 parametrelili (3 öteleme ve hız, 3 dönüklük ve hızı) Helmert dönüşümü kullanılarak koordinat sistemi tanımlaması yapılmıştır. IGS istasyonlarının öncül koordinat ve hız bilgileri "itr20m.apr" dosyasından alınmıştır. Ayrıca yazılım, donanım, deprem, yer değişikliği, lokal etkiler vb. nedenlere bağlı olarak istasyon koordinatlarında meydana gelen değişikliklerin olduğu "itr20.eq" dosyası da kullanılmıştır. Sonuç olarak ITRF2020 datumunda dengelenmiş ve elde edilen koordinat ve hızlar için hesaplanan Karesel Ortalama Hatalar Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen çözümler sonucunda örnek teşkil etmesi amacıyla ISTA istasyonunun GNSS koordinat zaman serileri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. GPS GLONASS BEIDOU ve GALILEO sistemine ait ISTA istasyonunun günlük zaman serisi

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Türkiye ve çevresindeki sabit GNSS istasyonlarının 2018-2023 yılları arasındaki verileri ile IGS REPRO3 ürünleri kullanılarak çoklu GNSS analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırma sonuçlarında, farklı GNSS sistem kombinasyonlarının konum ve hız belirleme hassasiyetleri incelenmiştir. GNSS sistemlerinin kombinasyonlarının performansı, konumların ve hızların standart sapmaları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Zaman serilerinin stokastik bileşeni olarak, beyaz gürültü yerine renkli gürültü modeli kullanılmıştır. Tablo 3'te, IGS ağında yer alan ve çözüme dahil edilen tüm istasyonlar ITRF2020 datumunda dengelenerek elde edilen konum ve hız bileşenlerine ilişkin karesel ortalama hataları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tablo 4' te ise örnek teşkil etmesi amacıyla 24 istasyon içerisinden seçilen ANKR, ISTA ve KIT3 istasyonlarına ait gözlem verileri analize dahil edilen noktaların ITRF2020 datumunda dengelenmesi sonucunda elde edilen konum ve hızlarının standart sapmaları gösterilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, çoklu GNSS sistemlerinin dahil edildiği çözümlerin performansını iyileştirdiğini göstermiştir. İstasyon bazında incelendiğinde, üçlü (GPS+GLONASS+GALILEO) ve dördü (GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU) sistemin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Konum standart sapmalarına göre, GPS, GLONASS ve GALILEO kombinasyonlarının tamamı kullanıldığında,

konum belirleme hassasiyetinde belirgin bir iyileşme görülmektedir. Özellikle GPS, GLONASS ve GALILEO kombinasyonu en düşük standart sapmalara sahiptir. Hız standart sapmalarına bakıldığında, GPS, GLONASS ve GALILEO kombinasyonları genellikle yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda, BEIDOU sisteminin GPS ve diğer uydu sistemleri üzerindeki etkisinin yüksek ve orta enlemlerde bozucu olabileceği belirtilmiştir (İnal, Bilgen, Bülbül ve Başbük, 2022). Çalışmamızda ise BEIDOU'nun tek başına kullanıldığı durumlarda, diğer GNSS sistemlerine kıyasla nispeten daha yüksek sapmaların oluştuğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, GNSS sistem kombinasyonlarının konum ve hız belirleme hassasiyetlerine olan etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, bazı GNSS kombinasyonlarının belirli avantajlar sunduğunu ve belirli sistemlerin tek başına kullanıldığında sınırlamaları olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan veri setlerinin teminine destek sağlayan Harita Genel Müdürlüğüne ve teknik altyapı konusunda yardımcı olan Jeodezi Dairesine teşekkür ederiz. Ayrıca bu çalışmayı hakem olarak inceleyen, zaman ve emek harcayarak yayının bilimsel kalitesinin artmasına yardımcı olan Hakemlere katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Tablo 3. Tüm istasyonlardaki GNSS Sistem Kombinasyonlarının Konum ve Hızlarının Karesel Ortalama Hatası (K: Kuzey-Güney, D: Doğu-Batı, Y: Yükseklik bileşenleri)

GNSS Sistemlerinin Kombinasyonu	Konumların Karesel Ortalama Hatası			Hızların Karesel Ortalama Hatası		
	K(mm)	D(mm)	Y(mm)	V_K (mm/yıl)	V_D (mm/yıl)	V_Y (mm/yıl)
GPS	5,45	7,61	8,28	2,05	0,97	1,64
GLONASS	8,42	11,35	7,82	2,08	1,79	1,76
GALILEO	10,6	12,37	5,52	2	0,84	1,43
BEIDOU	16,49	15,78	14,54	1,68	2,12	2,97
GPS ve GLONASS	5,84	7,53	7,2	2,04	1	1,64
GPS, GLONASS ve GALILEO	5,3	7,64	6,81	0,98	1,96	1,44
GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU	4,98	4,33	5,34	0,95	1,96	1,59

Tablo 4. ANKR, ISTA ve KIT3 İstasyonu için GNSS Sistem Kombinasyonlarına Göre Konum ve Hız Belirleme Standart Sapmaları (K: Kuzey-Güney, D: Doğu-Batı, Y: Yükseklik bileşenleri)

İstasyon İsmi	GNSS Sistemlerinin Kombinasyonu	Konumların Standart Sapması			Hızların Standart Sapması		
		K(mm)	D(mm)	Y(mm)	V_K (mm/yıl)	V_D (mm/yıl)	V_Y (mm/yıl)
ANKR	GPS	0,22	0,2	0,86	0,05	0,04	0,19
	GLONASS	0,24	0,32	1,02	0,08	0,06	0,25
	GALILEO	0,23	0,21	0,86	0,05	0,06	0,21
	BEIDOU	0,79	0,79	0,83	0,2	0,2	0,7
	GPS ve GLONASS	0,17	0,17	0,69	0,04	0,04	0,15
	GPS, GLONASS ve GALILEO	0,13	0,13	0,52	0,3	0,3	0,12
	GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU	0,15	0,13	0,55	0,3	0,3	0,12
ISTA	GPS	0,11	0,1	0,36	0,03	0,02	0,09
	GLONASS	0,14	0,17	0,52	0,03	0,04	0,14
	GALILEO	0,1	0,09	0,38	0,03	0,02	0,1
	BEIDOU	0,39	0,39	1,43	0,12	0,12	0,45
	GPS ve GLONASS	0,1	0,9	0,34	0,2	0,2	0,08
	GPS, GLONASS ve GALILEO	0,07	0,06	0,24	0,2	0,2	0,06
	GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU	0,09	0,07	0,28	0,2	0,2	0,07
KIT3	GPS	0,17	0,20	0,59	0,06	0,06	0,24
	GLONASS	0,30	0,41	1,09	0,13	0,20	0,55
	GALILEO	0,12	0,14	0,44	0,06	0,07	0,23
	BEIDOU	0,31	0,40	1,34	0,17	0,21	0,71
	GPS ve GLONASS	0,17	0,20	0,57	0,06	0,06	0,21
	GPS, GLONASS ve GALILEO	0,12	0,14	0,41	0,04	0,04	0,15
	GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU	0,16	0,15	0,49	0,04	0,04	0,16

ORCID

Mert SAĞLAM <https://orcid.org/0009-0002-6895-1681>Özgür ÖZEL <https://orcid.org/0000-0001-5192-9985>Bahadır AKTUĞ <https://orcid.org/0000-0002-7995-4477>

KAYNAKLAR

Alken, P., Beggan, C. D., Finlay, C. C. ve Maus, S. (2021). Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field. *Earth, Planets and Space*, 73(48). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01281-4>

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L. ve Chanard, K. (2023). ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*, 97(5), 47.

- Bahadır, B. ve Nohutcu, M. (2018). Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına etkisi. *Harita Dergisi*, 160, 1–16.
- Boehm, J., Werl, B. ve Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B2).
- Carrere, L., Lyard, F., Cancet, M. ve Guillot, A. (2015, April). FES 2014, a new tidal model on the global ocean with enhanced accuracy in shallow seas and in the Arctic region. In *EGU general assembly conference abstracts* (p. 5481).
- Desai, S. D., Sibois, A. ve Egbert, G. D. (2020). High-frequency Earth rotation models and their application to space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(10), e2020JB020280. <https://doi.org/10.1029/2020JB020280>
- Folkner, W. M., Williams, J. G. ve Boggs, D. H. (2014). *The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431*. The Interplanetary Network Progress Report, 42(196), 1-81.
- Herring, T. (2003). MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series. *GPS solutions*, 7, 194-199.
- Herring, T., King, R.W., Floyd, M.A. ve McClusky, S.C. (2018). *GAMIT reference manual*, GPS Analysis at MIT, Release 10.7. Erişim Adresi: http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science ve Business Media.
- İnal, C., Bilgen, B., Bülbül, S. ve Başbük, M. (2022). Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 109-115.
- International GNSS Service. (2019). 3rd Data Reprocessing Campaign (REPRO3), Erişim Adresi (10 Nisan 2024): <https://igs.org/acc/reprocessing/>
- Kurt, A.İ., Cingöz, A., Özdemir, S., Peker, S., Özel, Ö. ve Simav, M. (2020). Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) güncel koordinat ve hızlarının GNSS verilerinin yeniden değerlendirilmesi kapsamında hesaplanması. *Harita Dergisi*, 164, 1-17.
- Landskron, D. ve Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), pp. 349–360. DOI: 10.1007/s00190-017 1066-2
- Lyard, F., (2021). FES2014: A new tidal model – Validation results and the impact on satellite altimetry. *Ocean Science*, 17(4), 815-835.
- Massachusetts Institute of Technology. (2024). GAMIT/GLOBK incremental updates. Erişim adresi(15 Mart 2024): <http://geoweb.mit.edu/gg/updates.php>
- Mayer-Gürr, T., Wieser, M., Schardt, M. ve Scholz, J. (2022). *Reprocessing multiple GNSS constellations and a global station network from 1994 to 2020 with the raw observation approach* (Doktora Tezi). TU Graz, Geodesy. Verlag der Technischen Universität Graz.
- Petit, G. ve Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- Rodriguez-Solano, C. J., Hugentobler, U., Steigenberger, P., Bloßfeld, M. ve Fritsche, M. (2014). Reducing the draconitic errors in GNSS geodetic products. *Journal of Geodesy*, 88(6), 559–574.S
- Üstüner, C. İ. (2019). *Yakın yer uydu yörüngelerinin hassas nokta konumlama (PPP) tekniği ile belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Witchayangkoon, A. (2000). *Elements of Precise Point Positioning* (Doktora Tezi). M.S. University of Maine, Bangkok.