

Farklı Şiddetlerde Meydana Gelen Güneş Aktivitesinin GPS-PPP Doğruluğu Üzerindeki Etkisinin Bölgesel olarak Araştırılması

Aziz SARAÇOĞLU^{1*}

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ asaracoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/05/2023;

Kabul/Accepted:12/08/2023)

Öz: Son yıllarda GNSS (Global Navigation Satellite System) topluluğu içerisinde, (Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) yöntemi oldukça ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. PPP tekniği ile, herhangi bir referans istasyonuna ihtiyaç duymadan yalnızca tek bir alıcı kullanarak yüksek konum doğruluğuna erişmek mümkündür. Ancak birçok hata kaynağı PPP hassasiyetini doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemektedir. Bu çalışmada, Güneş'te meydana gelen farklı şiddetlerdeki aktivitelerin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki etkisi bölgesel olarak araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda kutup, orta ve ekvatorial enlem bölgesinden olmak üzere Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait üç istasyon seçilerek güneşte meydana gelen aktivite şiddetine göre GPS-PPP doğruluğundaki değişim izlenmiştir. Yaklaşık 11 yıllık güneş döngüsü dikkate alınarak 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait 60'ar günlük GPS verileri kullanılmıştır. GPS verileri, Güneşte meydana gelen aktivite değişimini tam olarak yansıtılması için gündüz vaktine denk gelen saat 10:00-18:00 aralığındaki 8 saatlik kısa veri oturumlarına bölünmüştür. Elde edilen tüm veri setleri NASA/JPL'nin GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımının Hassas Nokta Konumlama (PPP) modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Söz konusu üç farklı aktivite dönemi ve üç farklı bölgede gözlenen GPS-PPP doğruluğundaki değişimler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, güneşte meydana gelen patlamalar arttıkça GPS-PPP doğruluğunun azaldığı ve bu durumdan en fazla ekvatorial enlem bölgesinin etkilendiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: GPS, PPP, Konum doğruluğu, Güneş aktivitesi, Güneş patlamaları.

A Regional Investigation of the Effect of Solar Activity of Different Intensities on GPS-PPP Accuracy

Abstract: In recent years, Precise Point Positioning (PPP) has become a very interesting topic within the GNSS (Global Navigation Satellite System) community. With the PPP technique, it is possible to achieve high position accuracy using only a single receiver without the need for any reference station. However, many sources of error directly or indirectly affect PPP accuracy. In this study, the impact of different intensities of solar activity on GPS-PPP accuracy was investigated regionally. For this purpose, three stations belonging to the International GNSS Service (IGS) network were selected from the polar, mid-latitude and equatorial latitudes and the change in GPS-PPP accuracy was monitored according to the intensity of solar activity. Considering the solar cycle period of approximately 11 years, 60 days of GPS data for the minimum, medium and maximum activity periods between 2000-2018 were used. The GPS data were divided into short 8-hour data sessions between 10:00-18:00, which coincides with the daytime, to fully reflect the changes in solar activity. All data sets were analyzed using the Precision Point Positioning (PPP) module of NASA/JPL's GIPSY/OASIS II v6.4 software. The changes in GPS-PPP accuracy observed during the three different periods of activity and in three regions were compared. As a result of the comparisons, it was observed that the GPS-PPP accuracy decreases as the intensity of solar activity increases, with the equatorial latitude region being most affected.

Key words: GPS, PPP, Positioning accuracy, Solar activity, Solar flares.

1. Giriş

Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) tekniğinin, GNSS (Global Navigation Satellite System) konum belirleme teknikleri içerisindeki önemi ve kullanım oranı hızla artmaktadır. PPP tekniği, günümüzde yüksek yörünge hassasiyeti, gelişmiş saat ve atmosfer modelleri, veri işleme ve analizindeki gelişmeler sayesinde, tek bir alıcı kullanılarak referans istasyonuna ihtiyaç duymadan neredeyse rölatif konum belirleme tekniği hassasiyetine yakın bir doğrulukla koordinat bilgisi sağlayabilmektedir. Bu teknik, yayın efemerisi yerine hassas yörünge ve uydu saat değerleri kullanılmaktadır. Bu nedenle, kullanılan veriye ve ölçme süresine bağlı olarak elde edilebilecek doğruluk seviyesi de değişebilir. PPP tekniğinde, uydu yörünge ve saat

* Sorumlu yazar: asaracoglu@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3781-3964

hataları, küresel bir ağdan (ör. International GNSS Service, IGS) alınan farklı düzeltme ürünlerinin (hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin) elde edilmesi ile giderilmektedir. PPP yöntemi, ilk olarak [1] tarafından ortaya atılmış ve ardından [2], [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmalarıyla birlikte yaygın kullanıma başlanmıştır. PPP tekniği, referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırarak uygulamalarda birçok kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle, PPP tekniği günümüzde birçok GNSS uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. PPP, günümüzde tarım endüstrisi, hidrografi, deformasyon izleme ve insansız hava araçları ile havadan haritalama gibi birçok çalışmada kullanılan bir yöntemdir. PPP yöntemi kullanılarak hem statik hem de kinematik konum belirleme doğruluğu ve hassasiyeti hakkında çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir [4]–[13].

Günümüzde konum belirlemede en sık kullanılan uydu-tabanlı konum belirleme sistemlerinde elde edilecek konum doğruluğunu etkileyen uydu, alıcı veya çevresel faktörler gibi birçok hata kaynağı bulunmaktadır. Jeodezik, jeodinamik ve deformasyon analizi gibi çalışmalarda, bölgesel ve global düzeydeki PPP tekniği uygulamalarında birçok hata kaynağı dikkate alınmalı ve modellenmelidir. Bu sebeple, GPS ölçümlerine etki eden iyonosferik kırılma, yörünge doğruluğu, anten faz merkezi hatası, multipath etkisi ve troposferik gecikme gibi ana hata kaynaklarının etkileri tarihsel süreçte önemli ölçüde azaltılmıştır [14]–[16]. Birçok neden, uydu-tabanlı konum belirleme sistemlerindeki hata kaynaklarının oluşmasına sebep olur. Bunların en önemlileri, kuşkusuz mevsimsel değişimlerdir. Troposfer tabakasında, kuru gazlar ve su buharının neden olduğu sinyal gecikmeleri yaşanmakta ve sinyalin troposferdeki yayılma süresini artırmaktadır. Troposfer tabakasındaki bu etkiye, troposferik gecikme veya troposfer yolu gecikmesi denilmektedir. Bu gecikme değerleri yaz ve kış mevsimlerinde farklılık gösterir. Mevsimsel değişimlere bağlı olarak, yaz aylarındaki gecikme değerleri en yüksek seviyededir, kış aylarında ise en düşük seviyededir [17]–[19].

GPS sinyallerini etkileyen bir diğer faktör de güneşte meydana gelen aktiviteler sonucunda iyonosfer tabakasında meydana gelen değişimlerdir. İyonosfer tabakasında meydana gelen düzensiz değişimlerin birincil kaynağı güneş patlamalarıdır. Güneş patlaması, Güneş'in atmosferinde gözlenen ani parlaklık artışı olarak tanımlanabilir. Bu patlamalar, Güneş'in manyetik alanındaki ani değişikliklerden kaynaklanır ve Güneş'ten dış uzaya yüksek enerjili parçacıkların salınmasına neden olur. Bu parçacıklar, Dünya'ya ulaştığında manyetik fırtınalar ve radyasyon fırtınaları gibi etkiler yaratabilir. Güneş patlamaları, iletişim sistemleri, uydu sinyalleri ve hatta güç şebekeleri gibi teknolojik altyapıları olumsuz etkileyebilir. Güneş patlamalarının GPS doğruluğuna etkisi, yüksek enerjili parçacıkların Dünya'ya ulaşarak manyetik alanımızda dalgalanmalara ve manyetik fırtınalara neden olmasıdır. Manyetik fırtınalar GPS sinyallerini etkiler ve parlamaya neden olur. Bu nedenle iyonosferdeki iyonlaşmayı düzensiz olarak etkileyen manyetik fırtınaların konum belirleme üzerindeki etkilerinin araştırılması elzemdir. İyonosferden kaynaklanan etkilerin büyük derecede olanları Güneş'in en aktif (solar maksimum) olduğu zamanlarda meydana gelmektedir. İyonosferik aktivitenin en yüksek düzeyde olduğu bu dönem 11 yıllık bir periyotla süregelmektedir. Güneş aktivite etkilerinin araştırılması GPS'deki koordinat çözümlerinin doğruluğu bakımından oldukça önemlidir [20]–[28].

[20] çalışmasında solar maksimum döneminde, ekvatorial ve orta enlem bölgelerindeki iyonosferin GPS sinyalleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, atmosferin iyonosfer tabakasının tropikal bölgelerde orta enlem bölgelerine nazaran daha fazla elektrona sahip olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, ekvatorial kuşak üzerindeki GPS ölçülerinde iyonosfere bağlı konum hatasının orta enlem bölgesine nazaran daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Toplam elektron yoğunluğu (TEC) değişiminin güneş aktivitesinden etkilendiği ve güneş aktivitesinin her iki bölgede de TEC değişiminin ana faktörü olduğu sonucuna varmışlardır. [21] çalışmasında, solar minimum döneminde ekvatorial bölgedeki yıllık TEC değişimini incelemiştir. Bu çalışmada, ekvator bölgesindeki iyonosferik anomalinin maksimum seviyesinin 20° kuzey coğrafi enleminde yerel saat ile 14:00'da meydana geldiğini açıklamışlardır. Bu sonuç, ekvatorial bölgelerde gerçekleştirilecek GPS ölçümlerinin yerel saat olarak 14:00'da en yüksek Güneş aktivitesi kaynaklı konum hatasına sahip olacağını ortaya koymuşlardır. [22] çalışmasında, solar maksimum döneminde yerel uydu ağları için GPS verilerini kullanarak iyonosferik kırılma hatalarını azaltmaya yönelik analizler sunmuşlardır. Sonuç olarak, yerel ağlarda özellikle yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalarda, solar maksimum döneminde GPS verileri değerlendirilirken iyonosferik kırılma etkilerinin hesaba katılması gerektiğini vurgulamışlardır. [23] çalışmasında, solar maksimum ve minimum dönemlerinde Güneş aktivitesinin GPS doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Ancak yetersiz veri ve istasyon kullanımı nedeniyle bu etkileri görmek için daha fazla veri kullanılması gerektiğini belirtmiştir. [24] çalışmasında, solar maksimum döneminde ekvatorial bölgede iyonosferik aktivitenin GNSS sinyal performansına etkisini araştırmak için yaptıkları çalışmada ekvatorial bölgelerde yüksek solar aktivite dönemlerinde GNSS sinyalleri için günümüzde sorun olmaya devam ettiğini belirtmişlerdir. [25] gerçekleştirdiği çalışmasında, düşük ve yüksek güneş aktivitesinde, sırasıyla 2009 ve 2013 yıllarına ait dönem boyunca her aydan 5 gün seçilerek, düşük enleme sahip bir ağda GPS verilerinin analizi incelenmiştir. İyonosfer tabakasındaki toplam elektron yoğunluğunun (TEC) yüksek güneş aktivitesi döneminde özellikle öğle saatlerinde pik seviyeye ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca bu pik

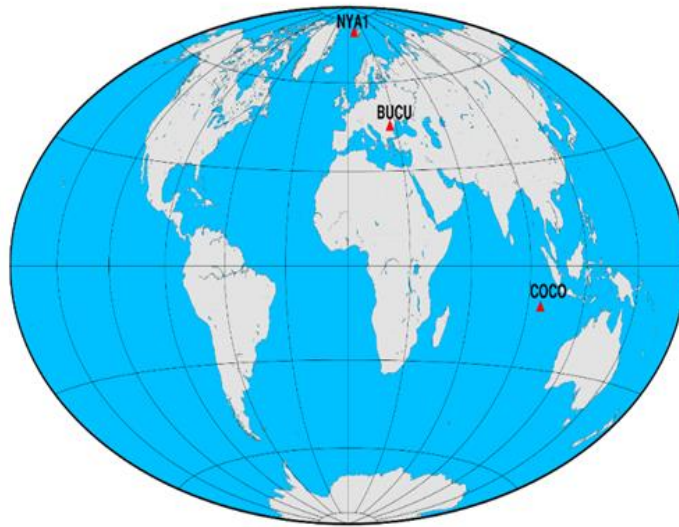
oluşumunun yaz ve kış mevsimlerinde ekinoks aylarına göre daha fazla olduğunu belirtilmiştir. [26] yaptıkları çalışmada, 2011 yılı şubat ayında gerçekleşen Güneş patlamasından sonra, Malezya üzerindeki ekvatorial ve alçak enlem bölgesinde iyonosferik sintilasyon oluşumunu araştırmışlardır. Çalışmada güneş patlamasının, Malezya bölgesi üzerinde GPS tabanlı hizmetlerin performansında makul seviyede bir bozulmaya sebep olduğu belirtilmiştir. [27] çalışmalarında, Hindistan Haydarabad'da bulunan bir referans istasyonunda 2013-2018 yılları arasında mevsimsel ve güneş aktivitesini dikkate alarak iyonosferik sintilasyonların kinematik hassas nokta konumlama üzerinde uzun vadeli etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, mevsimsel ve güneş aktivitesinin kinematik hassas nokta konumlama üzerinde olumsuz yönde bir etkiye sebep olduğu belirtilmiştir. [28] gerçekleştirdikleri çalışmada, GNSS alıcılarının verileri dikkate alınarak, güneş ve jeomanyetik aktivitelerin sebep olduğu global iyonosferik tepki incelenmiştir. Çalışmalarında iyonosfer tabakasının, güçlü jeomanyetik aktivite kaynaklı etkilere verdiği tepki analiz edilerek global ölçekte model sunmuşlardır. Elde edilen modelde, güneş aktivitesi faktörünün göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, atıf yapılan referanslarda yapılan çalışmalar genişletilerek daha kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Kutup, orta kuşak ve ekvator bölgelerinden olmak üzere, Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait üç istasyon seçilerek, farklı şiddetlerde meydana gelen güneş aktivitesinin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki bölgesel etkileri izlenmiştir. Bu amaçla, yaklaşık 11 yıllık güneş döngüsü dikkate alınarak, 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait 60 günlük GPS verileri kullanılmıştır. GPS verileri, güneş aktivitesinin etkilerini tam olarak yansıtılabilmesi amacıyla gündüz saatleri olan 10:00-18:00 arasındaki 8 saatlik kısa oturumlara bölünmüştür. Elde edilen veri setleri, NASA/JPL'nin GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımının Hassas Nokta Konumlama (PPP) modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu üç farklı aktivite dönemi ve üç farklı bölgede gözlenen GPS-PPP doğruluğu değişimleri karşılaştırılmıştır. Güneş'te farklı şiddetlerde meydana gelen aktivitelerin etkisi sonucunda oluşan güneş leke sayılarının GPS-PPP doğruluğu ile ilişkisi bölgesel olarak araştırılmış, elde edilen bulgular yorumlanmıştır.

2. Uygulama

2.1. Çalışma alanı

Güneş aktivitesinin farklı enlem bölgelerindeki etkisini incelemek amacıyla Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait kutup, orta kuşak ve ekvator bölgelerinde yer alan üç istasyon seçilmiştir. Çalışmada kullanılan üç istasyonun belirlenmesindeki motivasyon, farklı şiddetlerde meydana gelen Güneş aktivitesinin sonuçlar üzerindeki enlemsel karakteristiklerinin incelenmesidir. Bunun için kutup bölgesi NYA1, orta kuşak bölgesi BUCU ve ekvatorial bölgesi ise COCO istasyonu ile temsil edilmektedir (Tablo 1). Çalışmada kullanılan IGS istasyonları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan GPS istasyonları

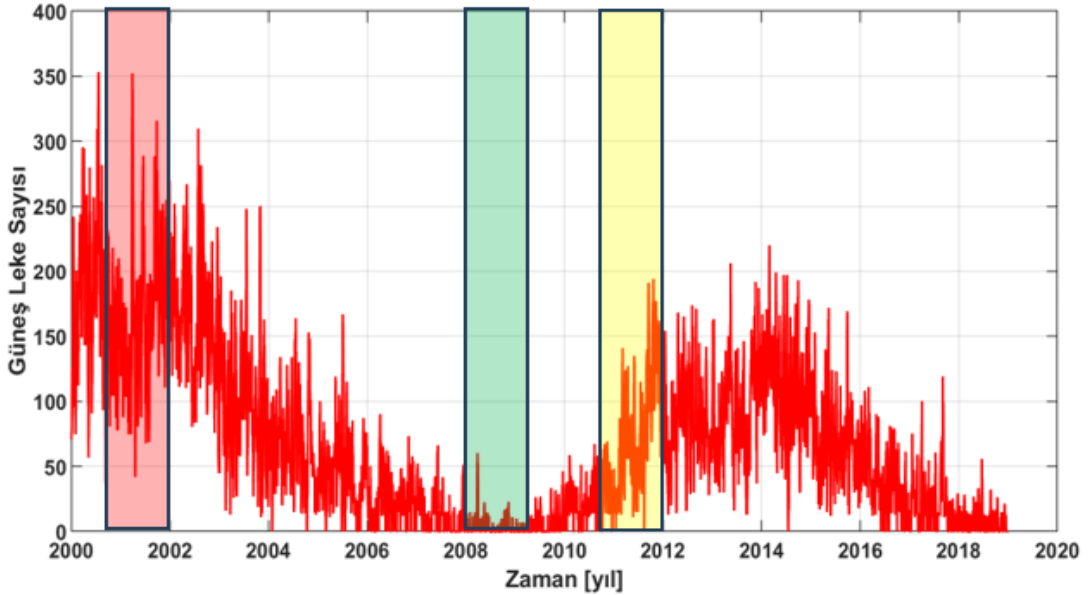
Tablo 1. Çalışmada kullanılan GPS istasyonlarına ait konum bilgileri

Nokta ID	Enlem (°)	Boylam (°)	Ülke
NYA1	78.930	11.865	Norveç
BUCU	44.464	26.126	Romanya
COCO	-12.188	96.834	Avustralya

2.2. Verilerin değerlendirilmesi

Bu çalışmada, güneşte meydana gelen aktivite şiddetinin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki bölgesel değişimlerini izlemek amacıyla farklı enlem bölgelerinden IGS ağına bağlı GPS istasyonları seçilmiştir. Çalışmada, 11 yıllık güneş döngüsü göz önünde bulundurularak, 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait 60'ar günlük GPS verileri kullanılmıştır (Şekil 2). Buna göre, güneş leke sayısının minimum olduğu zaman için 2008 ve 2009 yıllarından 60 gün, güneş leke sayısının ortalama bir değerde olduğu zaman için 2011 ve 2012 yıllarından 60 gün ve güneş leke sayısının maksimum olduğu zaman için ise 2001, 2002 yıllarından 60 günlük veri seti seçilmiştir. Şekil 2'de, 2000-2018 yılları arasında, aktivitenin düşük olduğu zaman dilimi yeşil, ortalama aktivitenin olduğu zaman dilimi sarı ve aktivitenin yüksek olduğu zaman dilimi ise kırmızı renk dolgu ile vurgulanmaktadır. Çalışmada değerlendirme için esas alınan zaman dilimi, Şekil 2'de farklı renkler ile vurgulanan alanlardan seçilmiştir.

Dünya'nın eksenini $23^{\circ}27'$ eğik olması Güneş ışınlarının yıl içinde gelme açısının değişmesinden dolayı kutup bölgelerinde altı ay gece, altı ay gündüz yaşanmasına neden olmaktadır. Çalışma için değerlendirilen günleri belirleme aşamasında, kutup bölgesinde yer alan NYA1 istasyonu için altı ay gündüz vakti içerisine denk gelmesine dikkat edilmiştir. Üç farklı bölgeden seçilen istasyonlara ait 2000-2018 yılları arasındaki 60'ar günlük GPS verileri SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) web sitesinden RINEX formatında elde edilmiştir [29]. Güneş aktivitesi etkilerini daha iyi izleyebilmek için veriler, gündüz vaktine denk gelen 10:00-18:00 saatleri arasındaki 8 saatlik kısa veri oturumlarına ayrılmıştır. Elde edilen tüm veriler, NASA/JPL'nin GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımının Hassas Nokta Konumlama (PPP) modülü kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada belirlenen günlere ait, 2000-2018 yılları arasında güneş leke sayılarının düşük, orta ve yüksek olduğu alanlar

PPP tekniğinde, hassas nokta konum bilgisine ulaşabilmek için GPS ölçülerine etki eden hata kaynaklarının giderilmesi ve modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, GPS verilerinin değerlendirilmesi ve analizi aşamasında, JPL tarafından sağlanan hassas uydu yörünge ve saat bilgileri kullanılmıştır. Alıcı saat hatası modellenmiş, alıcı ve uyduların anten faz merkezi kayıklıkları giderilmiştir [30]. Bu çalışmada analizler ITRF2008 datumunda gerçekleştirilmiştir [31]. Uydu yükseklik açısı 7° olarak belirlenmiştir. İyonosfer etkisi, L1 ve L2 GPS sinyalleri kullanarak oluşturulan L3 doğrusal modeli ile ortadan kaldırılmıştır. İkinci mertebeden iyonosferik etki göz önünde bulundurularak, "IONEX" dosyası kullanılarak giderilmiştir. Troposferik ıslak gecikme, doğu ve kuzey bileşenlerindeki gradyanlar kestirilmiştir. Karasal ve okyanus gelgit yüklemeleri göz önünde bulundurulmuştur. Değerlendirme stratejisi Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Değerlendirme stratejisi

Analiz parametreleri	PPP analiz stratejisi
GNSS sistemi	GPS
Referans sistemi	ITRF08 [31]
Uydu yörünge ve saat bilgileri	JPL nihai ürünleri
Epok aralığı	30 sn
Uydu yükseklik açısı	7°
Anten faz merkezi	Değerlendirme zamanındaki en güncel igs14_WWWW.xyz
İyonosferik etki	IGS IONEX dosyaları kullanılarak ikinci dereceden etki giderilmiştir.
Faz belirsizlikleri	Çözülmüştür [30]
Önsel troposfer modeli	VMF1 modeli [32]
Başucu ıslak gecikmesi kestirimi	Rastgele yürüyüş yöntemi ($5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)
Yatay gecikme gradyanları kestirimi	Rastgele yürüyüş yöntemi ($5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)
Gelgit etkisi	Katı gelgitler, okyanus yükü ve kutup gelgitleri [33]

2.3. Analiz ve bulgular

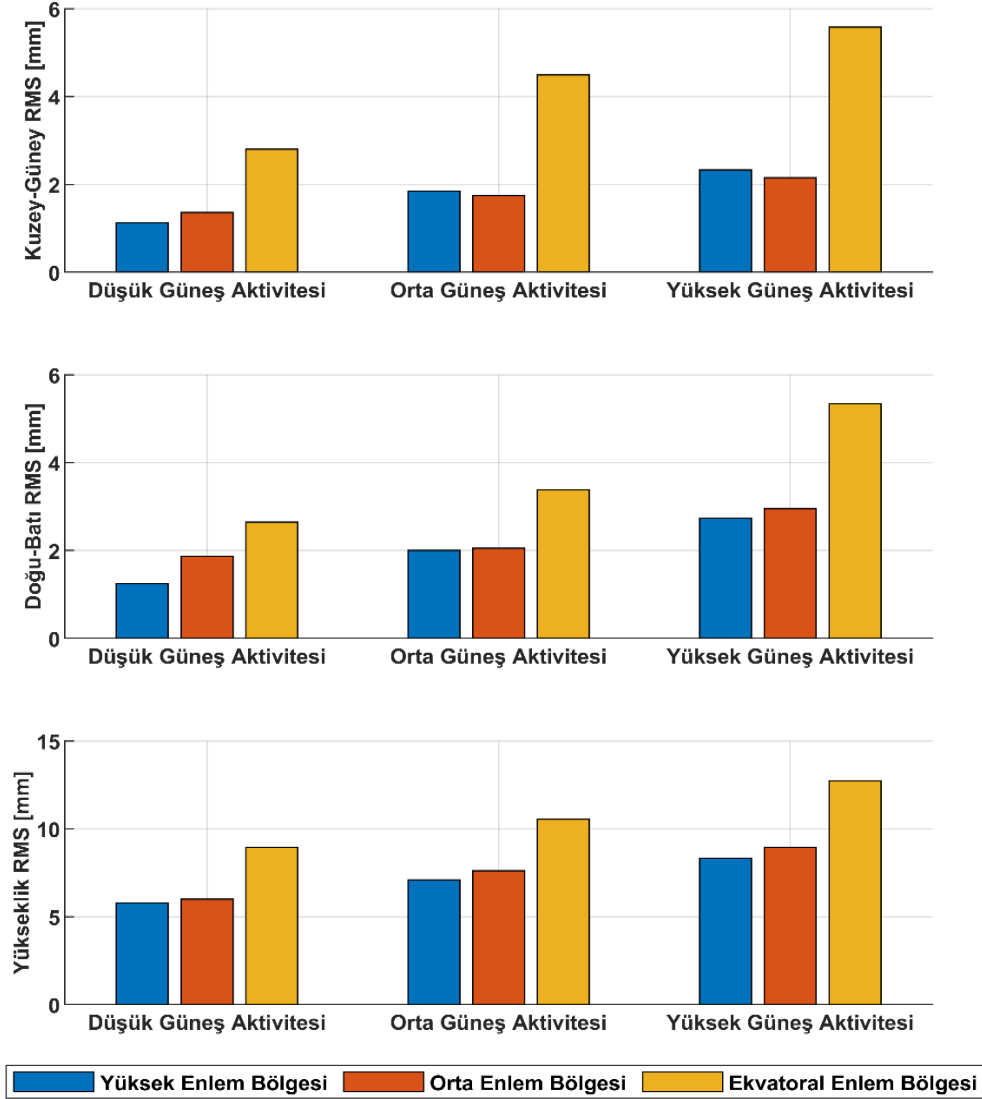
Öncelikle, ITRF14 referans sisteminde elde edilen üç boyutlu kartezyen koordinat değerleri, hareketin anlamlı bir şekilde yorumlanabilmesi için Kuzey, Doğu ve Yükseklik bileşenlerinden oluşan toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Her bir IGS istasyonu için hesaplanan yer merkezli koordinat değerlerinin ilk günlerine göre ötelenmiş gözlemlerin toposentrik koordinat sistemine dönüşümü Denklem 1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta k \\ \Delta d \\ \Delta y_{\text{yük}} \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cdot \cos \lambda & -\sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cdot \cos \lambda & \cos \varphi \cdot \sin \lambda & \sin \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_m \quad (1)$$

Denklem 1'deki, Δk , Δd ve $\Delta y_{\text{yük}}$ değerleri toposentrik koordinat sisteminde kuzey, doğu, yükseklik bileşenini, φ coğrafi enlemi, λ boylamı, ΔX , ΔY ve ΔZ değerleri ise ilk günlere göre ötelenmiş üç boyutlu

kartezyen koordinat değerlerini simgelemektedir. Daha sonra kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için minimum, orta ve maksimum güneş aktivitesi dönemlerine ait RMS (Karesel Ortalama Hata) değerleri Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada x koordinat değerlerini n ise veri sayısını temsil etmektedir.

$$RMS = \sqrt{\frac{x^2}{n}} \quad (2)$$



Şekil 3. Güneş aktivitesi şiddetine göre tüm bileşenler için RMS değerleri değişimi

Yüksek, orta ve ekvatorial enlem bölgelerinde kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşeni için hesaplanan RMS değerlerinin güneş aktivitesi şiddetine göre değişimi Şekil 3'te gösterilmektedir. Ayrıca RMS değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Şekil 3 ve Tablo 3 incelendiğinde, Güneş aktivitesinin şiddeti arttıkça GPS-PPP konum doğruluğunda azalma gözlenmektedir. GPS-PPP doğruluğu bölgesel olarak incelendiğinde ise, güneş aktivitesinden en fazla ekvatorial enlem bölgesinin etkilendiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile paralellik göstermektedir.

Tablo 3. Güneş aktivitesi şiddetine göre tüm bileşenler için RMS değerleri

Bölge	Bileşen	Minimum Aktivite RMS (mm)	Orta Aktivite RMS (mm)	Maksimum Aktivite RMS (mm)
Yüksek Enlem Bölgesi (NYA1)	Kuzey-Güney	1.1	1.8	2.3
	Doğu-Batı	1.3	2.0	2.7
	Yükseklik	5.8	7.1	8.3
Orta Enlem Bölgesi (BUCU)	Kuzey-Güney	1.4	1.7	2.2
	Doğu-Batı	1.9	2.1	2.9
	Yükseklik	6.0	7.6	8.9
Ekvatorial Enlem Bölgesi (COCO)	Kuzey-Güney	2.8	4.5	5.6
	Doğu-Batı	2.7	3.4	5.3
	Yükseklik	8.9	10.5	12.7

3. Sonuç ve Öneriler

Farklı şiddetlerde meydana gelen aktif Güneş olaylarının GPS-PPP konum doğruluğu üzerindeki bölgesel etkisini araştırmak amacıyla yaklaşık 11 yıllık güneş döngüsü dikkate alınarak 2000-2018 yılları arasındaki minimum, orta ve maksimum aktivite dönemlerine ait konum doğruluğu değişimi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda üç farklı güneş aktivitesi dönemine ait 60'ar günlük GPS verileri analiz edilerek GPS ölçülerine etki eden hata kaynaklarının büyük bir kısmı giderilmiştir. Veri analizinden sonra kuzey, doğu ve yükseklik koordinat bileşenlerine etki eden yıllık ve yarıyıllık döngüsel hareketler ve doğrusal varyasyon kaldırılmıştır. Bu etkiler kaldırıldıktan sonra elde edilen düzeltme değerlerinden kuzey, doğu ve yükseklik bileşenlerine ait RMS değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan RMS değerleri analiz edilerek yüksek, orta ve ekvatorial enlem bölgelerindeki doğruluk değişimi incelenmiştir. Üç farklı aktivite dönemi ve üç farklı enlem bölgesinde hesaplanan RMS değerleri karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmalar sonucunda elde edilen bulgulara göre;

- Güneşte meydana gelen aktivitenin şiddeti arttıkça GPS-PPP konum doğruluğunda azalma gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, güneş aktivitesine bağlı olarak iyonosfer tabakasında meydana gelen değişimler ile açıklanabilir. İyonosfer tabakasında iyonlaşma miktarı, güneş ışınımıyla ilişkilidir. Güneş ışınları, elektronları moleküllerinden ayırarak serbest hale getirir. Serbest elektron yoğunluğu, yerel saatle yaklaşık olarak 14:00 civarında en yüksek seviyeye ulaşır. Güneş lekelerinin sayısı ve güneş patlamaları, güneş ışınım seviyesini, buna bağlı olarak iyonlaşmayı ve iyonosferdeki serbest elektron miktarını önemli ölçüde etkilediği literatürde belirtilmiştir [34], [35]. Dolayısıyla, iyonosfer tabakasındaki iyonlaşma ve serbest elektronlar nedeniyle, uyduların alıcı arasındaki olması gereken gerçek geometrik uzunluk ile ölçülen mesafe arasında bir fark meydana getirerek GPS doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir.

- GPS-PPP konum doğruluğu bölgesel olarak incelendiğinde, güneş aktivitesinden en fazla ekvatorial enlem bölgesinin etkilendiği gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, iyonosferin coğrafi özellikleri ile açıklanabilir. Güçlü güneş radyasyonu ve yoğun iyonlaşma nedeniyle elektron yoğunluğunun en yüksek olduğu bölge ekvatorial bölgedir [36]. Dolayısıyla ekvatorial enlem bölgesinde GPS-PPP doğruluğu, yüksek ve orta enlem bölgesine nazaran güneş aktivitesinden daha fazla etkilenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, güneş aktivitesi GPS-PPP doğruluğu ve GPS veri analizi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Özellikle hassasiyet gerektiren çalışmalarda bu etki göz önünde bulundurulmalıdır. Güneş aktivitesinin GPS ölçüleri üzerindeki etkisini daha net görebilmek için veri aralığının ve istasyon ağının genişletilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Verilerin değerlendirilmesinde kullanılan GIPSY/OASIS II v6.4 yazılımı için NASA-JPL'ye, ayrıca veri ve ürün desteklerinden ötürü IGS'e teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Anderle, R J. Satellite Doppler Positioning: Proceedings, International Geodetic Symposium, October 12-14, 1976. The Symposium, 1976.
- [2] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, Watkins M M, Webb F H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 102, no. B3, pp. 5005–5017, 1997, doi: 10.1029/96JB03860.
- [3] Héroux P, Kouba J. GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, vol. 26, no. 6, pp. 573–578, Jan. 2001, doi: 10.1016/S1464-1895(01)00103-X.
- [4] Seepersad G, Bisnath S. Challenges in Assessing PPP Performance. *Journal of Applied Geodesy*, vol. 8, no. 3, pp. 205–222, Sep. 2014, doi: 10.1515/jag-2014-0008.
- [5] Shi j, Yuan X, Cai Y, Wang G. GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation. *GPS Solut*, vol. 21, no. 2, pp. 405–414, Apr. 2017, doi: 10.1007/s10291-016-0532-2.
- [6] Yigit C O, Gurlek E. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, no. 2, pp. 893–904, Dec. 2017, doi: 10.1080/19475705.2017.1284160.
- [7] Choy S, Bisnath S, Rizos C. Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solut*, vol. 21, no. 1, pp. 13–22, Jan. 2017, doi: 10.1007/s10291-016-0545-x.
- [8] Hernández H, Dollase D, Fernández M G, Perez R O, García A R. Precise ionospheric electron content monitoring from single-frequency GPS receivers. *GPS Solut*, vol. 22, no. 4, p. 102, Jul. 2018, doi: 10.1007/s10291-018-0767-1.
- [9] Krietemeyer A, Veldhuis M T, Marel H, Realini E, Giesen, N. Potential of Cost-Efficient Single Frequency GNSS Receivers for Water Vapor Monitoring. *Remote Sensing*, vol. 10, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2018, doi: 10.3390/rs10091493.
- [10] Erol S, Alkan R M, Ozulu İ M, İlçi V. Impact of different sampling rates on precise point positioning performance using online processing service. *Geo-spatial Information Science*, vol. 24, no. 2, pp. 302–312, Apr. 2021, doi: 10.1080/10095020.2020.1842811.
- [11] Vadakke S V, Aquino M, Marques H A, Moraes A. Mitigation of ionospheric scintillation effects on GNSS precise point positioning (PPP) at low latitudes. *J Geod*, vol. 94, no. 2, p. 15, Jan. 2020, doi: 10.1007/s00190-020-01345-z.
- [12] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, Héroux P. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. *Navigation*, vol. 57, no. 2, pp. 123–135, 2010, doi: 10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x.
- [13] Davis J L, Herring T A, Shapiro I, Rogers A E E, Elgered G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, vol. 20, no. 6, pp. 1593–1607, 1985, doi: 10.1029/RS020i006p01593.
- [14] Bock O, Doerflinger E. Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, vol. 26, no. 6, pp. 373–383, Jan. 2001, doi: 10.1016/S1464-1895(01)00069-2.
- [15] Olynik M C. Temporal Characteristics of GPS Error Sources and Their Impact on by Analysis. Msc, Calgary University, Calgary, 2002.
- [16] Hofmann B, Wellenhof H, Lichtenegger H, Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] EUREF Permanent GNSS Network. URL adres: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/troposphere/zpd_timeseries_station.php?station=ISTA00TUR. (Erişim Tarihi: 27.10.2022).
- [18] Saracoglu A, Sanli D U. Accuracy of GPS positioning concerning Köppen-Geiger climate classification. *Measurement*, vol. 181, p. 109629, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109629.
- [19] Saracoglu A, Sanli D U. 'Effect of meteorological seasons on the accuracy of GPS positioning', *Measurement*, vol. 152, p. 107301, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107301.
- [20] Sukcharoen T, Weng J, Charoenkalunyuta T, Wu F. Comparison of Ionosphere at Middle Latitude Zone during Solar Maximum and Solar Minimum. *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 262–268, Jan. 2017, doi: 10.7763/IJET.2017.V9.982.
- [21] Wu C C, Fry C D, Liu J Y, Liou K, Tseng C L. Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during the solar minimum: September 1996–August 1997. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 66, no. 3, pp. 199–207, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.jastp.2003.09.017.

- [22] Bosa J, Figurski M, Wielgosz P. A strategy for GPS data processing in a precise local network during high solar activity. *GPS Solutions*, vol. 7, no. 2, pp. 120–129, Aug. 2003, doi: 10.1007/s10291-003-0052-8.
- [23] Hansson A. Solar Cycles and the Accuracy and Precision of GNSS Measurements. MSc, Department of Urban Planning and Environment KTH, Division of Geodesy and Geoinformatics, Stockholm, 2013.
- [24] Fortes L P S, Lin T, Lachapelle G. Effects of the 2012–2013 solar maximum on GNSS signals in Brazil. *GPS Solut*, vol. 19, no. 2, pp. 309–319, Apr. 2015, doi: 10.1007/s10291-014-0389-1.
- [25] Kumar S. Ionospheric variability during quiet and disturb geomagnetic conditions for low and high solar activity year. *Indian J Phys*, vol. 96, no. 6, pp. 1635–1641, May 2022, doi: 10.1007/s12648-021-02124-y.
- [26] Seif A, Panda S K. Ionospheric scintillation characteristics from GPS observations over Malaysian region after the 2011 Valentine’s day solar flare. *Journal of Applied Geodesy*, vol. 17, no. 1, pp. 79–90, Jan. 2023, doi: 10.1515/jag-2022-0053.
- [27] Yousuf M, Dashora N, Sridhar M, Dutta G. Long-term impact of ionospheric scintillations on kinematic precise point positioning: seasonal and solar activity dependence over Indian low latitudes. *GPS Solut*, vol. 27, no. 1, p. 40, Dec. 2022, doi: 10.1007/s10291-022-01378-1.
- [28] Pulnits M S, Budnikov P A, Pulnits S A. Global Ionospheric Response to Intense Variations of Solar and Geomagnetic Activity According to the Data of the GNSS Global Networks of Navigation Receivers. *Geomagn. Aeron.*, vol. 63, no. 2, pp. 172–185, Apr. 2023, doi: 10.1134/S0016793222600898.
- [29] Scripps Orbit and Permanent Array Center. <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> (Erişim Tarihi: 14.10.2022).
- [30] Bertiger W, Desai S D, Haines B, et al. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *J Geod* 84, 327–337 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0371-9>
- [31] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J Geod*, vol. 85, no. 8, pp. 457–473, Aug. 2011, doi: 10.1007/s00190-011-0444-4.
- [32] Boehm J, Werl B, Schuh H. 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*, vol. 111, no. B2, 2006, doi: 10.1029/2005JB003629.
- [33] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, Francis O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004, *Ocean Dynamics*, vol. 56, no. 5, pp. 394–415, Dec. 2006, doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- [34] Kahveci M, Aliođlu D, Çetin G. Tek Frekanslı Gns Alıcılarında Kullanılan İyonosferik Etki Düzeltme Modellerinin Karşılaştırılması. *Konjes*. vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2021, doi: 10.36306/konjes.849391.
- [35] Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, vol. 36, no. 2, pp. 261–275, 2001, doi: 10.1029/2000RS002432.
- [36] Groves K M, Basu S, Quinn J M, Pedersen T R, Falinski K, Brown A, Ning P. A Comparison of GPS Performance in a Scintillation Environment at Ascension Island. p. 9, Sep. 2000.