

GNSS alıcılarındaki saat sıçramalarının hassas nokta konumlama (PPP) performansına etkisinin araştırılması

Berkay Bahadır^{1*} , Metin Nohutcu¹ 

¹Hacettepe Üniversitesi, Beytepe Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Çankaya, Ankara.

Öz: GNSS (Global Navigation Satellite Systems) alıcılarında, GNSS uydularında kullanılan yüksek hassasiyetli atomik saatlerin aksine, genellikle daha ekonomik saatler kullanılmaktadır. Kristal osilatörlere sahip bu saatlerin kullanıldığı alıcılar, kendi zaman ölçülerini GPS zamanı ile senkronize tutabilmek için iç saat hataları belirli bir seviyenin üzerine çıktığında GNSS ölçülerine periyodik düzeltmeler getirmektedir. Saat sıçraması (clock jump) olarak anılan bu düzeltmeler, faz kesikliğinden farklı olarak alınan tüm sinyallerde eşit miktarda ve milisaniyenin tam sayı katı olarak görülmektedir. Bu sıçramalar GNSS alıcıları tarafından üretilen zaman, kod ve faz ölçülerini etkilemekte, türü ve boyutu alıcıdan alıcıya farklılık göstermektedir. Özellikle kod ve faz ölçülerinde farklı etkilere sahip olduğunda, bu sıçramalar saat süreksizliğine neden olmakta ve tespit edilmediği durumlarda konum belirleme performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Saat sıçraması diferansiyel ve rölatif GNSS tekniklerinde farklı yardımıyla ortadan kaldırıldığı için çoğunlukla göz ardı edilmesine rağmen, Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) gibi mutlak konum belirleme tekniklerinde tespit edilip uygun bir şekilde düzeltilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada öncelikle etki ettiği GNSS ölçü türlerine göre farklı saat sıçraması tipleri tanımlanmıştır. Daha sonra GNSS ölçülerindeki saat sıçramalarını tespit etmek ve gidermek için geliştirilen algoritma detayları ile açıklanmıştır. Gerçek GNSS verileri kullanılarak yapılan testler, ilgili algoritmanın saat sıçramalarının tespitinde başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir. Son olarak, saat sıçramalarının tespit edilmediği durumlarda konum belirleme performansını nasıl etkilediğini araştırmak amacıyla gerçekleştirilen test ve buradan elde edilen sonuçlar bu çalışma kapsamında sunulmaktadır. Sonuçlar, saat sıçramalarının uygun bir şekilde tespit edilmediği takdirde, özellikle PPP tekniğinin konum belirleme performansını hem konum doğruluğu hem de tam sayı belirsizliği için geçen yakınsama süresi açısından olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: GNSS, Saat sıçraması, Hassas nokta konumlama

Investigation the impact of clock jumps in GNSS receivers on the performance of precise point positioning (PPP)

Abstract: The atomic clocks with cheap internal oscillators are usually used in GNSS (Global Navigation Satellite Systems) receivers rather than highly stable and accurate atomic clocks used in GNSS satellites. In order to be synchronized with GPS time, the receivers employing the atomic clocks equipped with crystal oscillators get periodical corrections to the GNSS observations when internal clock offset exceeds a threshold. These corrections so-called clock jumps are typically as an integer number of milliseconds and their amount is the same for the whole received signals, unlike the cycle slips. Since these clock jumps influence the time tag, pseudorange and carrier phase measurements produced by GNSS receivers, their types and amounts change from one receiver to another. Especially, when the clock jumps have different effects on code and phase measurements, they cause clock discontinuity and if they are not detected appropriately, they negatively affect the positioning performance. Although the impact of clock jumps is mostly ignored in differential and relative positioning techniques as they are eliminated by using double-differences, it is required to detect and repair clock jumps properly in absolute positioning techniques, such as Precise Point Positioning (PPP). In this study, the types of clock jumps depending on their effects on the measurements are introduced firstly. Then, the algorithm developed to detect and repair the clock jumps is explained in details. The experimental tests which include real GNSS data indicate that the algorithm can successfully be used for detecting clock jumps. Finally, an additional test, which is conducted to investigate how the positioning performance is influenced when the clock jumps are not appropriately detected, and its results are provided as a part of this study. The results present that if the clock jumps are not detected properly, they affect the positioning performance of PPP negatively in terms of positioning accuracy and convergence time.

Keywords: GNSS, Clock jumps, Precise point positioning

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 312 297 6990

Geliş Tarihi/Received: 22.05.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 27.08.2019



0000-0003-3169-8862, berkaybahadur@hacettepe.edu.tr (Bahadır B.)*
0000-0001-9582-582X, mnohutcu@hacettepe.edu.tr (Nohutcu M.)

1. Giriş

GNSS (Global Navigation Satellite System) alıcılarının çoğunda yüksek doğruluğa sahip olmayan daha ekonomik osilatörlerin yer aldığı atomik saatler kullanılmaktadır. Bu alıcılar, saat hatalarının yüksek değerlere ulaşmasına engel olabilmek için kendi saatlerini GPS (Global Positioning System) zamanı ile senkronize tutmaya çalışır (Kim & Langley, 2001). Bunun için GNSS alıcısı üreticileri tarafından yaygın olarak kullanılan iki temel yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilkinde, alıcı saat hatasını neredeyse sıfırda tutacak şekilde osilatör yönlendirebilir. Bu durumda alıcının saat hatası belirli bir gürültü seviyesi içinde sabit olarak kalır. İkinci yaklaşımda ise, alıcı GPS zamanına göre kendi iç saat hatası belirli bir seviyenin üzerine çıktığında periyodik sıçramalar şeklinde bu farkı ölçümlere yansıtır. GNSS alıcılarında temel olarak üretilen zaman, kod ve faz ölçülerinden en az bir tanesi bu sıçramalardan etkilenir. Bunlara saat sıçraması adı verilir ve karakteristik olarak milisaniyenin tam katı olarak gözlenir. Saat sıçramaları faz kesikliklerinin aksine alınan tüm sinyallerde eşit miktarda bir etki yaratır (Guo & Zhang, 2014).

Alıcıdan bağımsız veri değişim formatı olan RINEX (Receiver Independent Exchange Format) dosyalarında kod ve faz ölçüleriyle birlikte ilgili ölçülerin alıcı tarafından ne zaman kaydedildiğini gösteren zaman bilgisi yani saat etiketi (time tag) bulunmaktadır. Bu üç temel RINEX verisi saat sıçramasından etkilenebilir ancak saat sıçramasının etkisi üç temel ölçü üzerinde her zaman benzer şekilde görülmez. Genel anlamda etki ettikleri GNSS ölçü türlerine göre dört tip saat sıçraması vardır (Tablo 1). Tip 1’de sadece gözlem dosyalarındaki saat etiketlerinde saat sıçraması görülür ve saat etiketi aralıkları gözlem süresi boyunca sabit değildir. Tip 2 saat sıçramasında ise Tip 1’e ek olarak kod ölçüsü de saat sıçramasından etkilenir. Tip 2 saat sıçraması her zaman Tip 1 ile birlikte görülmektedir. Tip 3 saat sıçramasına gelindiğinde ise yalnızca kod ölçüsü saat sıçramalarından etkilenirken saat etiketi ve faz ölçüsü sıçramalardan etkilenmez. Son olarak, Tip 4’de saat etiketleri saat sıçramasından etkilenmezken kod ve faz ölçüleri birlikte saat sıçramasından etkilenir (Guo & Zhang, 2014).

Tablo 1: Etki ettikleri GNSS ölçü türlerine göre saat sıçraması tipleri

Saat Sıçraması Tipi	Saat Etiketleri	Kod Ölçüsü	Faz Ölçüsü
Tip 1	+	-	-
Tip 2	+	+	-
Tip 3	-	+	-
Tip 4	-	+	+

Tip 1 ve Tip 4 saat sıçramalarında, kod ve faz ölçüleri arasında tutarsızlık olmadığı için genellikle bu tip saat sıçramalarının düzeltilmesine gerek yoktur. Ancak Tip 2 ve Tip 3 saat sıçramalarının, kod ve faz ölçüleri arasında tutarsızlık yarattığı için dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Rölatif ve/veya diferansiyel konum belirleme tekniklerinde saat sıçramasının neden olduğu tutarsızlıklar, fark alma teknikleri yardımıyla ortadan kaldırıldığı için genellikle göz ardı edilir. Ancak tek alıcının kullanıldığı mutlak konum belirleme tekniklerinde, özellikle Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning - PPP) yönteminde, saat sıçramalarının yarattığı ölçü tutarsızlıkları uygun bir şekilde tespit edilip ele alınmazsa konum belirleme performansını kötü yönde etkilemektedir. Özellikle, bilinmeyen parametrelerin tahmininde navigasyon uygulamalarında yaygın olarak uygulanan Kalman Filtresi kullanıldığı durumlarda saat sıçramalarının neden olduğu ölçü tutarsızlıkları nedeniyle bilinmeyen parametrelerin gerek öncül gerekse ölçü süresi boyunca stokastik karakterlerini belirlemek oldukça güçtür (Grewal, Weill & Andrews, 2007; Lonchay, Bidaine & Warnant, 2011). Bu durum, parametrelerin yanlış ya da daha az duyarlılıkla belirlenmesine yol açar. Diğer taraftan, saat sıçramalarının neden olduğu tutarsızlıklar aykırı verilerin tespit edildiği ön işlem adımında da algoritmaların başarılı bir şekilde çalışmasını engellemektedir (Grewal vd., 2007).

Bu çalışmada öncelikle GNSS alıcı saat sıçramalarını tespit etmek ve etkisini gidermek için geliştirilen algoritma kapsamlı

bir şekilde sunulacaktır. Daha sonra bu algoritmanın saat sıçramalarının tespitinde ne kadar başarılı olduğu gerçek ve simüle edilmiş GNSS verileri yardımıyla ölçülecek ve belirlenecektir. Son olarak saat sıçramalarının konum belirleme üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenecektir.

2. Saat Sıçramalarının Tespiti ve Etkisinin Giderilmesi

Saat sıçramaları daha önce belirtildiği üzere periyodik şekilde milisaniyenin tam katı olarak alınan bütün sinyallerde eşit miktarda görülmektedir (Kim & Langley, 2001). Bu karakteristik özellikleri sayesinde saat sıçramaları GNSS ölçüleri üzerinden tespit edilebilir. Bu çalışma kapsamında saat sıçramalarının tespiti için kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonlarını temel alan bir gözlem denklemi kullanılmıştır. Kod (P) ve faz (L) gözlemlerinin iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonları (IF) için ölçü eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle, 2007; Grewal vd., 2007):

$$P_{IF} = \rho + cdt_r - cdt^s + T + b_{r,IF} - b_{IF}^s + \varepsilon(P_{IF}) \quad (1)$$

$$L_{IF} = \rho + cdt_r - cdt^s + T + \lambda_{IF}N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s + \varepsilon(L_{IF}) \quad (2)$$

burada ρ geometrik mesafeyi, cdt_r alıcı saat hatasını, cdt^s uydur saat hatasını, T sinyaller üzerindeki troposferik etkiyi, λ_{IF} ve N_{IF} sırasıyla iyonosferden bağımsız kombinasyon için dalga boyu ve belirsizlik parametresini, $b_{r,IF}$ ve b_{IF}^s sırasıyla iyonosferden bağımsız kombinasyon için kod donanım kaynaklı alıcı ve uydur hatalarını, $B_{r,IF}$ ve B_{IF}^s sırasıyla iyonosferden bağımsız kombinasyon için faz donanım kaynaklı alıcı ve uydur hatalarını, ε ise gürültüyü ifade etmektedir. Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak yeni bir gözlem aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$W = P_{IF} - L_{IF} = (b_{r,IF} - b_{IF}^s) - \lambda_{IF}N_{IF} - (B_{r,IF} - B_{IF}^s) + \varepsilon(W) \quad (3)$$

Eşitlik (3)'ten görüleceği üzere oluşturulan yeni gözlem (W) kod ve faz ölçülerinin bir kombinasyonudur. İlgili gözlem kod ve faz ölçülerinin içerdiği geometrik ve atmosferik kısımları ortadan kaldırmaktadır. Ancak bu kombinasyonla birlikte daha hassas olduğu bilinen faz ölçüleri yüksek gürültü değerine sahip kod ölçüleriyle kirlenmektedir. Saat sıçramalarının tespiti ve belirlenmesi esnasında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuçta, (W) gözlemi yalnızca belirsizlik parametresini ve kod ile faz gözlemleri için donanım kaynaklı hataları içermektedir. Faz kesikliği olmadığı ya da varsa düzeltildiği varsayılırsa donanım kaynaklı hatalar oldukça stabildir ve kısa sürelerde ciddi değişiklikler göstermez. Tüm bunlar göz önünde bulundurulursa, saat sıçramalarının tespiti için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$\Delta W = W(i) - W(i - 1) \quad (4)$$

Burada i spesifik bir epogu, Δ ise epoklar arası fark operatörünü göstermektedir. Saat sıçraması meydana geldiğinde Eşitlik (4)'te sunulan ΔW gözleminde ciddi bir değişiklik meydana gelir ve bu şekilde saat sıçramaları tespit edilebilir. Ancak yine de ΔW gözleminde meydana gelen her değişiklik saat sıçramasından kaynaklı değildir. ΔW gözleminde meydana gelen değişikliklerin saat sıçramasından kaynaklı olup olmadığını anlamak için saat sıçramalarının milisaniyenin tam katı olma karakteristiği kullanılabilir. Yani meydana gelen saat sıçraması en az 1 milisaniye olacaktır ve dolayısıyla ΔW 'de oluşan fark belirli bir gürültü seviyesi içerisinde bu değerden büyük olursa ancak saat sıçraması kaynaklı denilebilir. Bunun için kullanılacak kriter aşağıda sunulmuştur (Guo & Zhang, 2014).

$$|\Delta W| > 10^{-3} \cdot c - 3\sigma \quad (5)$$

Burada c mutlak değer operatörünü, c ışık hızını ve σ ise W gözleminin gürültü seviyesini göstermektedir ($\sigma = 3-5$ m). Bununla birlikte saat sıçramaları ile ilgili ilave bir doğrulama testi yapılabilir. Saat sıçramaları sinyal alınan bütün uyduların gözlemlerinde eşit miktardadır. Buradan yola çıkarak Eşitlik (5)'in saat sıçraması olduğu öngörülen epok için görülen bütün uydularda tespit edilip edilmediği kontrol edilmelidir. Bu doğrulamadan sonra ΔW gözlemi en yakın tam sayıya yuvarlanarak kaç milisaniyeye eşit olduğu hesaplanabilir.

Saat sıçramaları tespit edildikten sonra uygun bir yöntemle kod ve faz ölçüleri arasındaki tutarsızlığın ortadan kaldırılması gerekir. Burada saat sıçramalarına faz kesikliği gibi davranarak ölçülerin sürekliliğini sağlamak için kod ölçülerini tespit edilen saat sıçramaları ile düzeltmek alıcı saat hatasında kümülatif bir artışa neden olur. Bu durum konum belirleme performansını kötü yönde etkileyecektir. Bunun yerine saat sıçraması görülmeyen faz ölçüleri, kod ölçülerinde saat sıçraması tespit edilen epoklarda ilgili sıçrama miktarı kadar düzeltilerek kod ve faz ölçüleri birbirleriyle uyumlu hale getirilir (Guo & Zhang, 2014; Momoh, Bhattarai & Ziebart, 2019). Yani bir başka deyişle faz ölçülerine ilave saat sıçramaları eklenerek kod ölçülerine benzer hale getirilir. Böylelikle ölçüler arasında tutarsızlık bulunan Tip 2 ve Tip 3 saat sıçramaları Tip 4 haline dönüştürülmüş olur. Tüm bu işlemler RINEX dosyasının yapısını bozmadan ilgili GNSS çözümünden önce ön işlem adımında gerçekleştirilmelidir. GNSS çözümünde ön işlem adımında saat sıçraması düzeltildikten sonra elde edilen yeni gözlemler kullanılmalıdır.

3. Uygulama

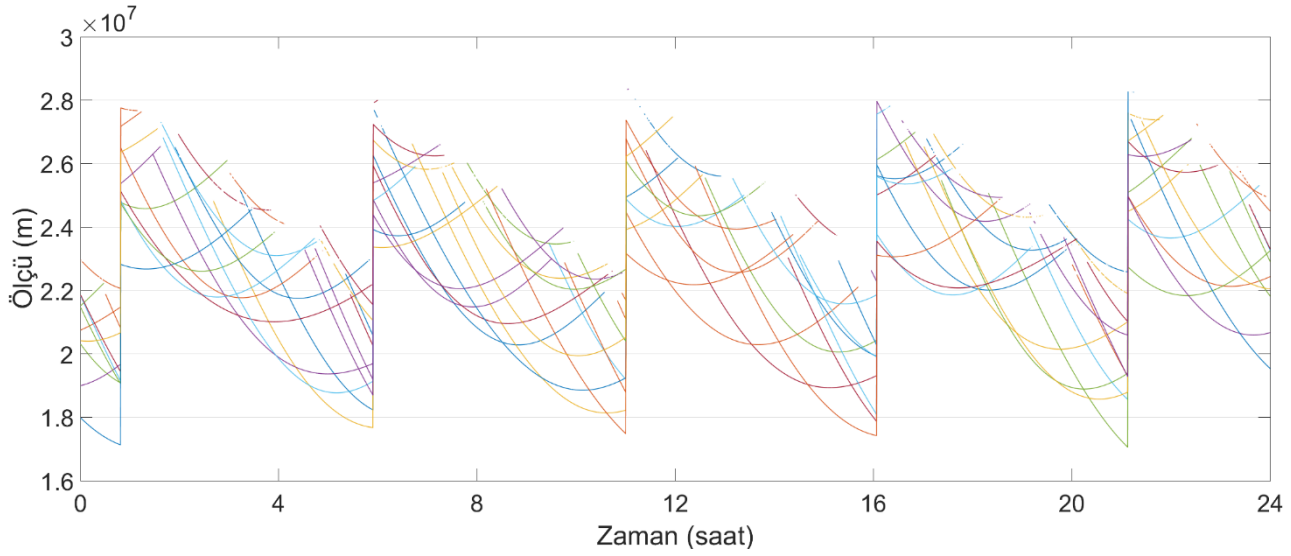
Bu kısımda öncelikle saat sıçramalarının ölçüler üzerinde yarattığı tutarsızlıklar gerçek GNSS verileri yardımıyla irdelenecektir. Daha sonra bir önceki bölümde açıklanan algoritma ile saat sıçramalarının tespiti araştırılacaktır. Ayrıca simüle edilmiş veriler kullanılacak ve algoritmanın ne kadar başarı ile saat sıçramalarını tespit ettiği ortaya konacaktır. Son olarak, saat sıçramalarının konum belirleme performansı üzerindeki etkisi örneklerle incelenecektir.

3.1 Deneysel Çalışma 1: Gerçek Veri

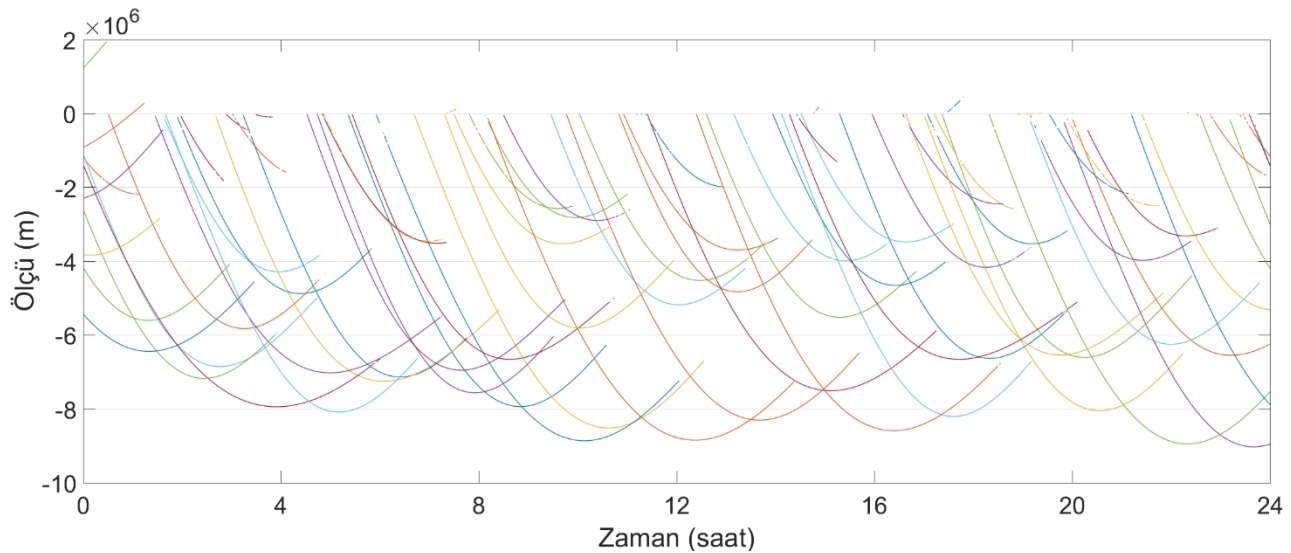
Her tip saat sıçramasının düzeltilmesine gerek olmadığından bu bölümde kod ve faz ölçüleri arasında tutarsızlığa neden olan Tip 2 ve Tip 3 saat sıçramaları incelenmiştir. Öncelikle saat sıçramalarının gerçek GNSS verisi üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için 2017 yılının ilk gününde ZWE2 adlı IGS (International GNSS Service) istasyonunda toplanan 24 saatlik ve 30 saniye aralıklı gözlem verisi kullanılmıştır. Tüm IGS istasyonlarından toplanan gözlem verileri taranarak çalışmada kullanılmaya uygun yani Tip 2 ve Tip 3 saat sıçramalarına sahip gözlem verileri tespit edilmiş ve aralarından ZWE2 istasyonu çalışma için belirlenmiştir. İlgili istasyon SEPT POLARX2 model GNSS alıcısına sahiptir ve gözlem verisinde Tip 3 saat sıçraması mevcuttur. Şekil 1 ve 2 sırasıyla ZWE2 istasyonunda toplanan bütün GPS uydularına ait P1 ve L1 ölçülerini göstermektedir. Şekillerden rahatlıkla görüleceği üzere ölçüler arasında tutarsızlığa neden olan Tip 3 saat sıçraması bu istasyonda görülmektedir. İlgili istasyonda yaklaşık her 5 saatte bir 19 milisaniyelik saat sıçraması meydana gelmektedir. Daha öncede belirtildiği üzere saat sıçramasının meydana geldiği anda görülen bütün uydular bundan etkilenmektedir. Daha ayrıntılı bakılacak olursa, ZWE2 istasyonundan toplanan günlük GNSS verisinde yer alan PRN02 uydusu için P1 ve L1 gözlemleri Şekil 3'te sunulmuştur. Görüleceği üzere uydunun görünür olduğu zamana düşen saat sıçramalarından P1 ölçüsü etkilenmiş ve L1 ölçüsü ile arasında tutarsızlık meydana gelmiştir. Bu tutarsızlık eğer tespit edilip düzeltilemezse konum belirleme performansını kötü yönde etkileyecektir.

Saat sıçraması kaynaklı ölçü tutarsızlıklarını tespit edebilmek için bir önceki bölümde kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız kombinasyonlarına bağlı yeni bir gözlem önerilmişti. ZWE2 istasyonun PRN02 uydusu için ΔW değerleri Şekil 4'te sunulmuştur. Ayrıca Şekil 5 bu farkların yakınlaştırılmış halini göstermektedir. Şekil 5'ten görüleceği üzere saat

sıçraması olmadığı zaman ΔW gözlemi belirli bir gürültü seviyesi içinde sabittir. Saat sıçraması olduğunda ΔW gözlemi büyük miktarlarda değişmektedir. Bu durum Şekil 4'te daha iyi bir şekilde gözlenmektedir.



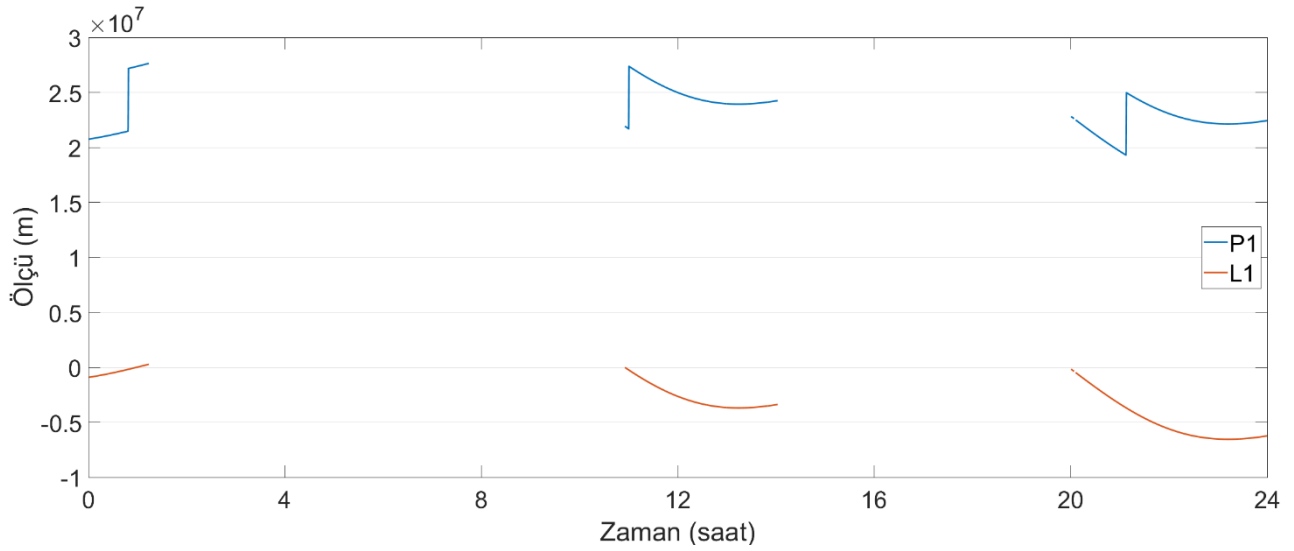
Şekil 1: 2007 yılının ilk gününde ZWE2 istasyonunda bütün gün boyunca toplanan GPS uyduları için P1 ölçüsü



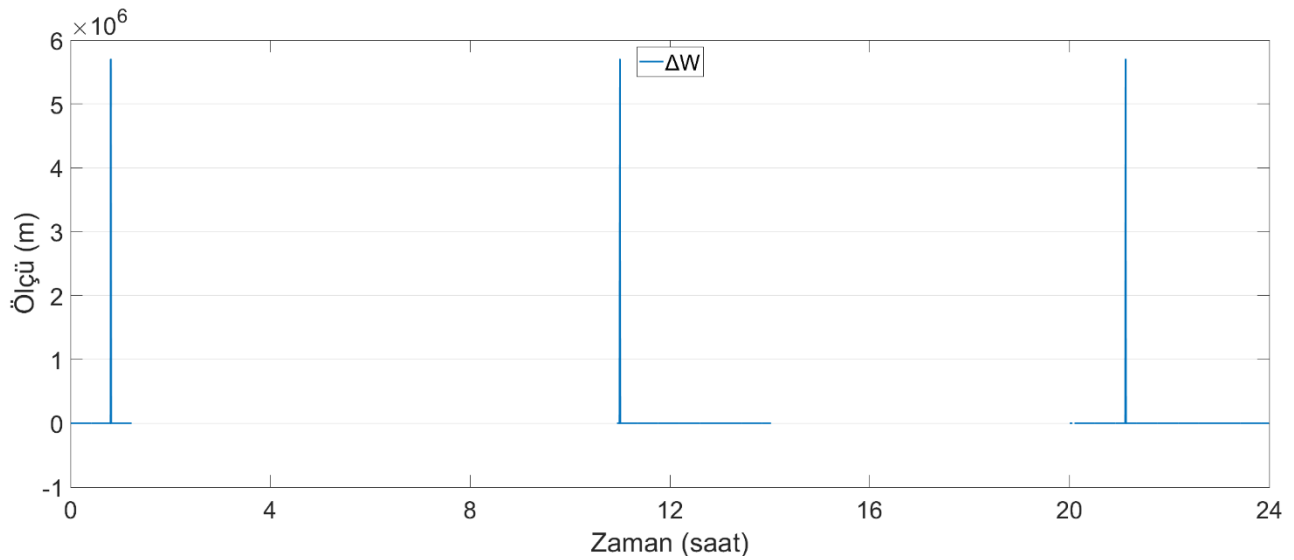
Şekil 2: 2007 yılının ilk gününde ZWE2 istasyonunda bütün gün boyunca toplanan GPS uyduları için L1 ölçüsü

3.2 Deneysel Çalışma 2: Simülasyon Verisi

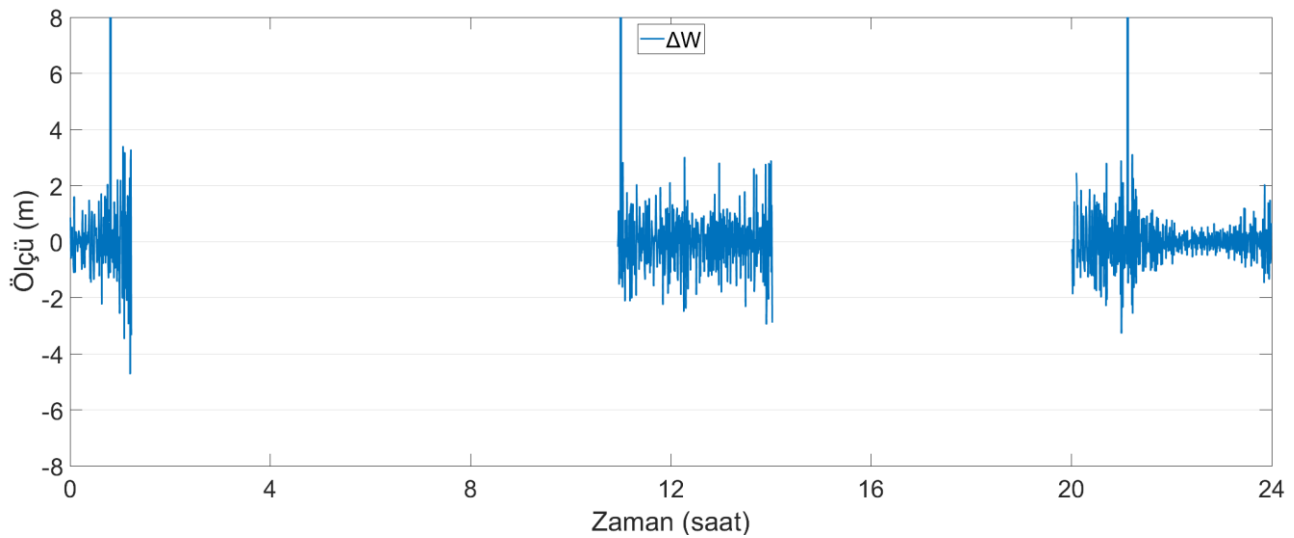
Saat sıçramaları, karakteristik özellikleri kullanılarak bir önceki bölümde açıklanan algoritma yardımıyla belirlenebilir. Bu algoritmanın saat sıçramalarını ne kadar başarıyla belirleyebildiğini araştırmak için ayrıca bir test gerçekleştirilmiştir. Bu testte 2019 yılının 70. gününde IGS ağına dahil İstanbul'daki ISTA istasyonunda toplanan ve öncesinde yapılan analizlerde saat sıçraması barındırmadığı tespit edilen günlük GNSS verisine farklı miktar ve aralıklarda saat sıçramaları eklenerek simüle edilmiştir. Simüle edilmiş bu verilerden, ilgili algoritma kullanılarak saat sıçramaları tespit edilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere 500 tane Tip 2 ve 500 tane Tip 3 olmak üzere toplamda 1000 adet saat sıçraması simüle edilmiştir. İlgili algoritma bunların neredeyse %99'unu başarı ile tespit etmiştir. Burada algoritmanın oldukça yüksek bir yüzdeyle saat sıçramalarını belirleyebildiği söylenebilir.



Şekil 3: 2007 yılının ilk gününde ZWE2 istasyonunda toplanan PRN02 adlı GPS uydusuna ait P1 ve L1 ölçüleri



Şekil 4: PRN02 uydusuna ait ΔW gözlemleri



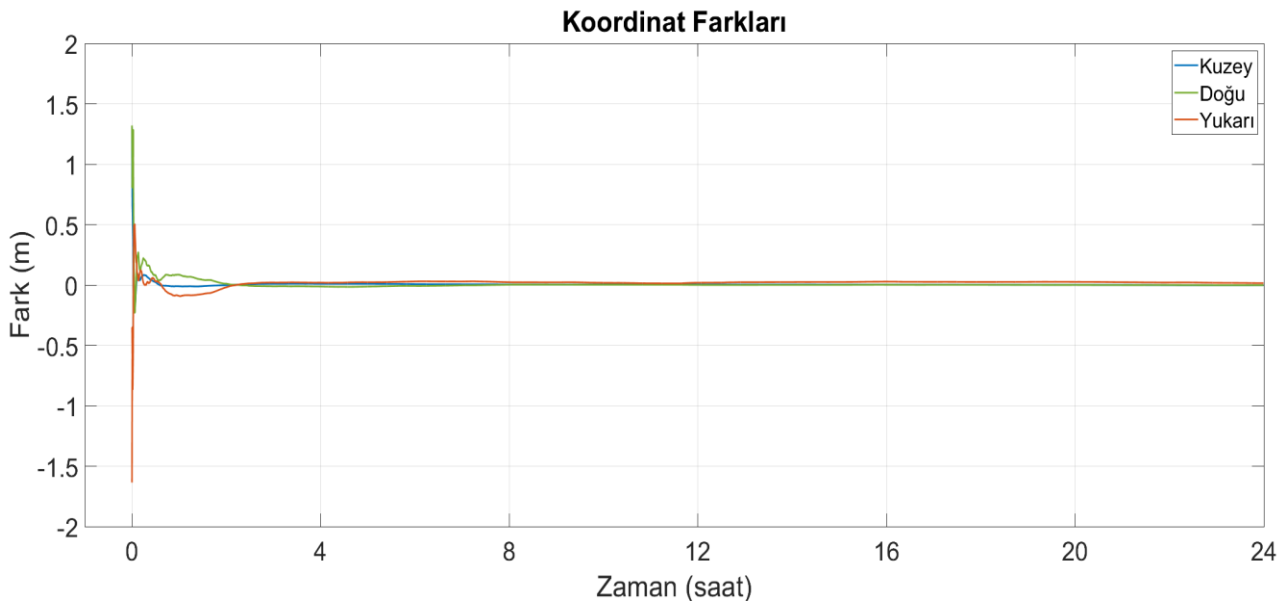
Şekil 5: PRN02 uydusuna ait ΔW gözlemleri (yakınlaştırılmış)

Tablo 2: Etki ettikleri GNSS ölçü türlerine göre saat sıçraması tipleri

Simüle Edilen Saat Sıçraması Sayısı	Tespit Edilen Saat Sıçraması Sayısı	Başarı Oranı (%)
Tip 2	500	496
Tip 3	500	492
Toplam	1000	988

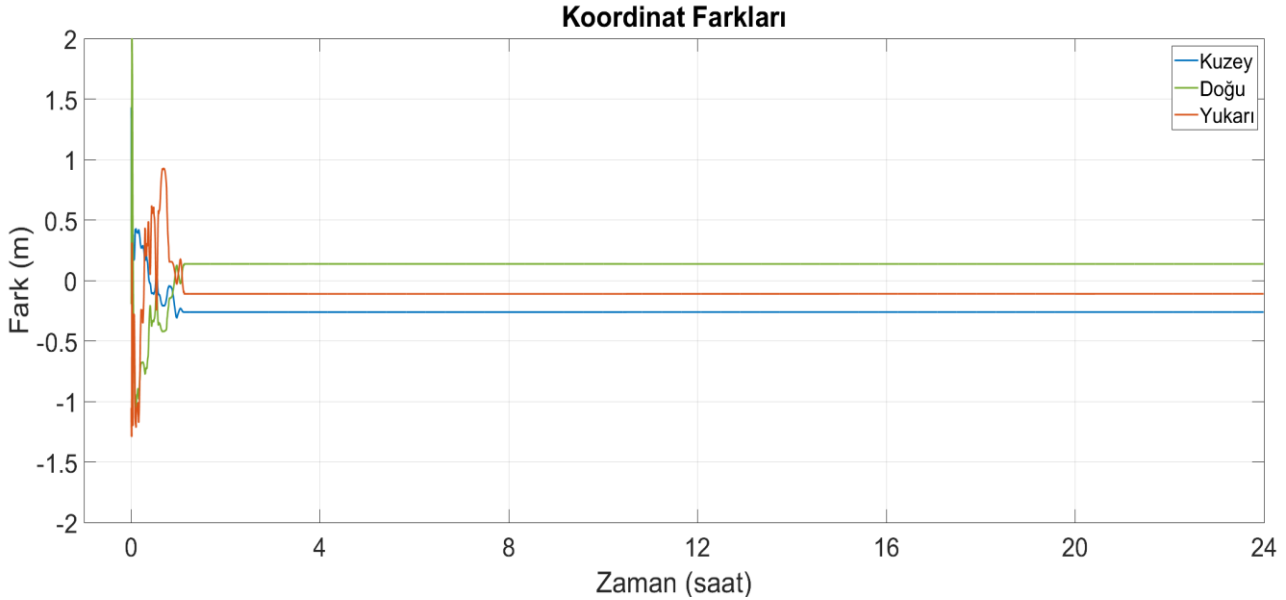
3.3 Saat Sıçramalarının Konum Doğruluğuna Etkisi

Saat sıçramalarının tespit edilemediği durumlarda konum belirleme performansını nasıl etkilediğini araştırmak için yine 2019 yılının 70. gününde ISTA istasyonundan toplanan günlük GNSS verisi kullanılmıştır. Bu veriye birinci saatin sonunda başlamak üzere yaklaşık birer saat arayla 1 milisaniyelik saat sıçramaları yapay olarak eklenerek ilgili gözlem verisi Tip 3 saat sıçraması içerir hale dönüştürülmüştür. Elde edilen veri kullanılarak saat sıçraması tespit edilmiş ve düzeltilerek statik modda PPP çözümü gerçekleştirilmiştir. PPP çözümü için çoklu-GNSS entegrasyonu gerçekleştirebilen açık-kaynaklı bir GNSS analiz yazılımı olan PPPH kullanılmıştır (Bahadır & Nohutcu, 2018). Bu şekilde gerçekleştirilen PPP çözümünden elde edilen koordinat farkları Şekil 6'da sunulmuştur. Burada bahsi geçen koordinat farkları IGS haftalık çözümlerinden elde edilen hassas istasyon koordinatları referans alınarak lokal koordinat sisteminde (kuzey, doğu ve yukarı) hesaplanmıştır. Şekil 6'dan görüleceği üzere PPP çözümü kısa bir süre içerisinde yakınsamıştır. Günün sonunda yani 24 saatlik çözümün sonunda kuzey, doğu ve yukarı yönde elde edilen koordinat farkları sırasıyla -0.2, -0.1 ve 1.6 cm'dir. Ayrıca koordinat farkları için hesap edilen karesel ortalama hata (KOH) değerleri ise sırasıyla 0.5, 1.6 ve 2.9 cm'dir. Bu değerler PPP çözümünün gerçekleştirildiği PPPH adlı yazılımdan hesaplanmıştır ve hesaplamalar ile ilgili detaylı bilgiler Bahadır ve Nohutcu (2018)'de bulunabilir.

**Şekil 6:** Saat sıçraması düzeltilen PPP çözümünden elde edilen koordinat farkları (kuzey, doğu ve yukarı)

Diğer taraftan ilgili PPP çözümü aynı şartlar altında bu sefer saat sıçraması düzeltilmeden gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen koordinat farkları ise yine kuzey, doğu ve yukarı yönlerde Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 7'den görüleceği üzere saat sıçramaları konum belirleme doğruluğunu kötü yönde etkilemiştir. Kod ve faz gözlemleri arasındaki tutarsızlık çözümün doğruluğunu azaltmış ve bir noktadan sonra saat sıçraması ilgili yazılımda filtreleme aşamasında kullanılan robust istatistik yöntemler tarafından aykırı değer olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla sinyal alınan bütün uydular saat sıçramasından etkilendiği için bütün uyduların ölçüleri aykırı değer olarak kabul edilip çözümünün yanlış bir yere yakınsamasına yol

açmıştır. Çözümün sonunda elde edilen koordinat farkları kuzey, doğu ve yukarı yönde sırasıyla -26.2, 13.7 ve -11.0 cm'dir. Elde edilen KOH değerleri ise sırasıyla 26.2, 17.8 ve 16.3 cm'dir. Yine bu değerler PPP çözümün gerçekleştirildiği PPPH adlı yazılımdan hesaplanmıştır. Özetle, elde edilen sonuçlar göstermiştir ki saat sıçramalarının tespit edilip uygun bir şekilde düzeltilmediği durumlarda özellikle PPP gibi hassas mutlak konum belirleme tekniklerinin performansı kötü yönde etkilenmektedir.



Şekil 7: Saat sıçraması düzeltilmeyen PPP çözümünden elde edilen koordinat farkları (kuzey, doğu ve yukarı)

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, öncelikle saat sıçraması ve etki ettiği ölçü türlerine göre saat sıçrama tipleri açıklanmıştır. Daha sonra, kod ve faz ölçüleri arasında tutarsızlığa yol açan Tip 2 ve Tip 3 saat sıçramalarını tespit edilebilmek için geliştirilen ölçülerin iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonlarına dayanan algoritma detaylarıyla birlikte sunulmuştur. Ayrıca, saat sıçramalarının ölçüler üzerinde yarattığı tutarsızlıklar gerçek GNSS verileri kullanılarak incelenmiştir. Ardından, bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmanın saat sıçramalarının tespitinde olan başarısını ölçmek için 1000 adet yapay saat sıçraması gerçek GNSS verilerine simüle edilmiştir. Simüle edilen bu veriler üzerinden gerçekleştirilen testler, ilgili algoritmanın %99 gibi yüksek bir başarı yüzdesi ile saat sıçramalarını tespit edebildiğini ortaya koymuştur. Diğer taraftan, saat sıçramalarının konum belirleme performansına olan etkisini araştırmak için deneysel bir test gerçekleştirilmiştir. Bu testte, yapay olarak saat sıçraması eklenen günlük GNSS verisi kullanılarak öncelikle saat sıçramaları düzeltilerek ve ardından da aynı veri kullanılarak saat sıçraması düzeltilmeden PPP çözümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, saat sıçramalarının düzeltilmediği durumlarda PPP çözümünün konum belirleme performansını kötü yönde etkilediğini göstermektedir.

Sonuçta, PPP gibi tek alıcıya dayanan mutlak konum belirleme tekniklerinde kod ve faz ölçüleri arasında tutarsızlığa yol açtığı durumlarda saat sıçramalarının mutlaka uygun bir yöntem kullanılarak tespit edilmesi ve düzeltilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde bilinmeyen parametrelerin kestirimi için ihtiyaç duyulan stokastik süreçlerin gerçekçi bir biçimde belirlenmesi önemli ölçüde güçleşmektedir. Ayrıca, saat sıçramaları mutlak konum belirleme tekniklerinin temel işlem adımları arasında yer alan faz kesikliği ve diğer aykırı değerlerin tespitinde zorluklara yol açmaktadır. Dolayısıyla, saat sıçramaları diferansiyel/rölatif konum belirleme tekniklerinin aksine PPP gibi mutlak konum belirleme tekniklerinde mutlaka göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konudur.

Teşekkür

Bu çalışma, 118Y410 no'lu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Bahadır, B., & Nohutcu, M. (2018). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4), 113.
- Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2007). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.
- Guo, F., & Zhang, X. (2014). Real-time clock jump compensation for precise point positioning. *GPS solutions*, 18(1), 41-50.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Kim, D., & Langley, R. B. (2001). Instantaneous real-time cycle-slip correction of dual frequency GPS data. *Proceedings of the international symposium on kinematic systems in geodesy, geomatics and navigation*, 255-264.
- Lonchay, M., Bidaine, B., & Warnant, R. (2011, September). An efficient dual and triple frequency preprocessing method for GALILEO and GPS signals. *3rd International Colloquium—Scientific and Fundamentals Aspects of the GALILEO Programme*.
- Momoh, J. A., Bhattarai, S., & Ziebart, M. (2019). Receiver clock jump and cycle slip correction algorithm for single-frequency GNSS receivers. *GPS Solutions*, 23(2), 38.