

Düşük Maliyetli GNSS Alıcılarının Çoklu-GNSS PPP Performanslarının Farklı Anten Tipleri ve Ağırlık Modellerine Göre Araştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 24.10.2023

Kabul/Accepted: 07.03.2024

Yayımlandı/Published: 29.04.2024

Investigation of Multi-GNSS PPP Performance of Low-Cost GNSS Receivers with Different Antenna Types and Weight Models

Sinan Birinci^{*} , Furkan Soğukkuşu^{*} , Nezir Sözen^{*} , Mustafa İkiz^{*} , Miray Ezgi Kerimoğlu^{*} , Mehmet Halis Saka^{*} 

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Düşük maliyetli GNSS donanımlarındaki güncel gelişmeler hassas konum belirleme uygulamalarında jeodezik donanımlara güçlü bir alternatif sunmaktadır. Bu donanımlar hem ekonomik hem de boyut olarak kullanıcılara birçok avantaj sağlamaktadır. Ancak tasarım yapısı itibarıyla ve çok yolluluk etkisine daha fazla duyarlı olmalarından dolayı gözlemlerdeki gürültü seviyesi artmaktadır. Bu nedenle, Hassas Nokta Konumlama (PPP) çözümlerinde güvenilir bir kestirim sonucu için gözlemlerin uygun ağırlıklandırılması kritik önem teşkil eder. Bu çalışmada ana hedef olarak düşük maliyetli alıcı ve antenler için uygun ağırlıklandırma modeli araştırılmıştır. Deneysel bir düzenele, çift frekanslı çoklu-GNSS gözlemleri toplayabilen düşük maliyetli u-blox ZED-F9P GNSS alıcısının PPP performansı farklı anten tiplerinin etkileri incelenecek şekilde ele alınmıştır. Bu amaçla, birbirine yakın iki sabit noktada, bu alıcılardan birine jeodezik NovAtel 702 anteni, diğerine ise düşük maliyetli u-blox ANN-MB-00-00 anteni bağlanarak eş zamanlı olarak GNSS verileri toplanmıştır. PPP çözümleri, uydü yükseklik açısına ve taşıyıcı-gürültü yoğunluk oranı (carrier-to-noise density ratio-C/N0)'a bağlı ağırlıklandırma modelleri kullanılarak; dört farklı GNSS kombinasyonu (GPS (G), GPS+GLONASS (GR), GPS+GLONASS+Galileo (GRE) ve GPS+GLONASS+Galileo+BDS-2 (GREC)) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre; NovAtel 702 anteni çözümlerinde ağırlıklandırma modelleri arasında anlamlı farklar not edilmezken; GRE ve GREC kombinasyonlarında yaklaşık olarak 20 dk yakınsama süresinden sonra 3 boyutta 7 cm konumlama doğruluğu üretilmiştir. U-blox ANN-MB-00-00 anteni sonuçlarında ise C/N0 tabanlı ağırlıklandırma modeli yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma modelinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu antende en iyi sonuç, 66,36 dk yakınsama süresi ve 3 boyutta 8,42 cm doğruluk ile GREC kombinasyonu ve C/N0 ağırlık modeli kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Statik PPP; Düşük Maliyetli GNSS Alıcısı; Konumlama Doğruluğu; GNSS Anteni; Ağırlık Modeli; C/N0.

Abstract

Recent developments in low-cost GNSS equipment offer a powerful alternative to geodetic equipment for precise positioning applications. The low-cost equipment has many advantages to users both economically and in terms of size. However, the noise level in the observations increases due to the design structure and the fact that they are more sensitive to the multipath effect. Thus, the appropriate weighting of observations is critical for a reliable estimation result in Precise Point Positioning (PPP) solutions. The main objective of the study is to investigate the appropriate weighting model for low-cost antennas and receivers. In an experimental setup, the PPP performance of a low-cost u-blox ZED-F9P GNSS receiver capable of collecting dual-frequency multi-GNSS observations is examined by analyzing the effects of different antenna types. For this purpose, GNSS data were collected simultaneously at two fixed points close to each other by connecting a geodetic NovAtel 702 antenna to one of these receivers and a low-cost u-blox ANN-MB-00-00 antenna to the other. PPP solutions were carried out with four different GNSS combinations (GPS (G), GPS+GLONASS (GR), GPS+GLONASS+Galileo (GRE), and GPS+GLONASS+Galileo+BDS-2 (GREC)) using weighting models based on satellite elevation angle and carrier-to-noise density ratio (C/N0). According to the results of this study, there were no significant differences in the weighting models for the NovAtel 702 antenna solutions, while the GRE and GREC combinations generated a positioning accuracy of 7 cm in 3D after a convergence time of approximately 20 minutes. For the U-blox ANN-MB-00-00 antenna results, the C/N0-based weighting model outperformed the elevation angle-based weighting model. The best result for this antenna was obtained using the GREC combination and the C/N0 weight model with a convergence time of 66,36 min and an accuracy of 8,42 cm in three dimension.

Keywords: Static PPP; Low-cost GNSS Receiver; Positioning Accuracy; Weight Model; C/N0

1. Giriş

Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) tekniği, ikinci bir alıcıya gerek duymaksızın tek GNSS alıcısı ile yüksek hassasiyette konum ve zaman bilgisi sağlayan

mutlak konum belirleme yöntemidir (Zumberge *et al.* 1997). Bu yöntem çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin yanında hassas uydü yörünge ve saat ürünleri kullanılarak, uygun kestirim teknikleri ile ölçüm anı bazlı olarak çözümlerin sunulmasını içermektedir (Kouba and Héroux

2001). PPP'nin kullanım açısından çok esnek olması, ekonomik anlamda bağıl konum belirlemeye göre avantaj sağlaması onu öne çıkaran temel etkenler olarak sıralanabilir. Teknolojik gelişmelerin paralelinde yüksek maliyetli hassas jeodezik donanımlara muadil, çift frekanslı veri toplayabilme özelliğine sahip düşük maliyetli alıcıların üretimiyle (örneğin; İsviçreli çip üreticisi u-blox ZED-F9P GNSS yonga seti) bu alanda PPP üzerine yapılan araştırmalar gittikçe artmaya başlamıştır. Özellikle bu donanımların navigasyon, deformasyonların izlenmesi, atmosferik çalışmalar ve arazi uygulamaları gibi birçok alanda kullanımı son dönemde yaygınlaşmıştır (Nie *et al.* 2020, Xue *et al.* 2021, Ogutcu *et al.* 2023, Oku Topal *et al.* 2023, Yi *et al.* 2021, Stępniaak and Paziewski 2022, Wielgocka *et al.* 2021). Ayrıca akıllı telefonlar arasında çift frekans özelliğine sahip cihaz sayısı da gün geçtikçe artmaktadır. Akıllı cihazlar ile yapılan uygulamalarda statik PPP'de desimetre seviyesinde, kinematik PPP'de ise birkaç metre seviyesinde konumlama performansının elde edildiği belirtilmektedir (Wang *et al.* 2021). Hamza vd. (2021) farklı antenler kullanarak u-blox ZED-F9P GNSS alıcısı ve PPP tekniğiyle birkaç santimetreye kadar olan yer değiştirmelerin tespit edileceğini göstermişlerdir. Romero-Andrade vd. (2021) aynı alıcı ve u-blox ANN-MB-00-00 anteni ile yaptığı çalışmada örneklem aralığının PPP çözümlerine etkisini araştırmışlar; GPS ve GLONASS gözlemlerini bütünleşik kullanıldığı çalışmalarında statik oturumlarda santimetre mertebesinde konumlama doğruluğuna ulaşıldığı sonucuna varmışlardır. Bir diğer çalışmada farklı çok bantlı antenlere bağlanan ZED-F9P alıcısı ile hem statik yer değiştirme hareketleri hem de dinamik hareketler test edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre düşük maliyetli donanımların santimetre mertebesinde hassasiyet sunduğu ve mevcut GNSS ağlarının sıklaştırılmasında umut verici olduğundan söz edilmiştir (Hohensinn *et al.* 2022). Ek olarak, gerçek zamanlı PPP uygulamalarında kullanılan u-blox ZED-F9P alıcısı ve u-blox ANN-MB-00-00 anteni donanımlarıyla yapılan bir deneyde statik ve kinematik senaryolarda desimetre seviyesinde konumlama performansı elde edilmiştir (Bezcioglu 2023). Konumlama tabanlı çalışmaların dışında; düşük maliyetli alıcıların atmosfer izlemesi için iyi bir potansiyele sahip olup olmadığının araştırıldığı bir çalışmada PPP tekniği uygulanmış ve düşük maliyetli donanımların jeodezik alıcılar ile karşılaştırılabilir bir troposfer kestirim başarısı gösterdiği belirtilmiştir (Stępniaak and Paziewski 2022).

PPP yöntemi, bağıl yöntemlere nazaran maliyet, uygulanabilirlik ve esneklik açısından etkin ve yaygın bir biçimde kullanılmasına rağmen, gerçek zamanlı

uygulamalardaki en büyük dezavantajı, kestirilecek parametrelerin gerçek değerlerine ulaşması için gerekli olan yakınsama süresidir. Yukarıda sözü edilen bu doğruluklar, yakınsama süresinden sonra elde edilen doğruluklardır. Bu sürenin kısaltılması için son 10 yıldır çoklu-GNSS kombinasyonları ile PPP çözümleri üzerine yoğunlaşmıştır. Yani GPS ile birlikte Rusya'ya ait GLONASS, Avrupa Birliği'ne ait Galileo ve Çin'e ait olan BDS (BeiDou Navigation System) uydu takımları bütünleşik şekilde kullanılmaktadır (Alkan *et al.* 2017, Ogutcu 2019, Chen *et al.* 2021). Ek olarak geleneksel PPP yerine PPP-AR (Ambiguity Resolution) tekniği de yakınsama süresinin kısaltılmasına katkı sağlamaktadır (Ge *et al.* 2008, Bezcioglu vd. 2019). Bu dört uydu takımına ait gözlemleri kaydeden u-blox donanımları ile yapılan bir diğer çalışmada açık gökyüzü ortamına sahip bir alanda farklı kombinasyonların yakınsama süreleri ele alındığında en iyi çözümü GPS+GLONASS+Galileo+BDS PPP kombinasyonunun sağladığı sonucu elde edilmiştir (Elmezayen and El-Rabbany 2021).

Bu faktörlerin yanı sıra, parametre kestirimi sırasında kullanılan filtreleme tekniklerinde stokastik modelleme çözümünün performansını doğrudan etkilemektedir. Eğer stokastik model gözlemlerin gürültüsünü ne kadar iyi yansıtabilirse parametreler de gerçek değerlerine o kadar hızlı yakınsayabilir (Paziewski 2020). Jeodezik tipteki GNSS alıcıları için uydu yükseklik açısı ve gözlem gürültüsü arasındaki güçlü korelasyondan ötürü genellikle yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma yöntemleri ile stokastik model oluşturulmaktadır (Li *et al.* 2016). Ancak düşük maliyetli alıcılar göz önüne alındığında, donanım koşulu kısıtlamaları nedeniyle gözlem kalitesi düşmektedir. Taşıyıcı-gürültü yoğunluk oranı (carrier-to-noise density ratio, C/N0) değerleri jeodezik muadillerinden yaklaşık 10 dB-Hz daha azdır. Ek olarak, kullanılan doğrusal veya dairesel polarize antenler fazlaca çok yolluluk etkisine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, gözlem gürültüsü artmakta, kaba hatalı ölçülerin oranı yükselmektedir. Bu donanımlardaki gürültü, uydu yükseklik açısından ziyade C/N0 değerleri ile daha fazla korelasyona sahip olduğundan düşük maliyetli donanımlar için yükseklik açısı yerine C/N0 tabanlı ağırlıklandırma modeli kullanmanın daha uygun olduğu vurgulanmıştır (Paziewski *et al.* 2019, Shinghal and Bisnath 2021). Ek olarak, Wang vd. (2021) yaptığı çalışmada ele aldığı bir uydunun kod ölçüsüne ait düzeltmenin 50 metreden fazla olduğu bir t anında uydu yükseklik açısı değerinin yüksek, C/N0 değerinin ise düşük olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bu donanımlarda ölçüm hatalarının C/N0 ile daha uyumlu olduğu ortaya konulmuştur. Özetlemek

gerekirse, düşük maliyetli GNSS donanımlarında son dönemdeki gelişmeler ile PPP tekniği birleştiğinde hem ekonomik hem de doğruluk açısından çok umut verici sonuçlar alınmıştır. Özellikle çoklu-GNSS kullanımı bu süreçteki ana gövdeyi oluşturan etmenlerden olmuştur. Bunun yanı sıra bu donanımların karakteristiğinin jeodezik alıcılardan farklı olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, daha iyi konumlama performansları elde edebilmek için stokastik modellemede geleneksel yöntemlerin aksine C/NO'a bağlı ağırlıklandırmanın verimli sonuçlar doğuracağına altı çizilmiştir.

Bu çalışmada, düşük maliyetli u-blox ZED-F9P GNSS alıcısının konumlama performansı farklı tipte antenler kullanılarak araştırılmıştır. Görüş engelini bulunmadığı açık gökyüzü ortamına sahip alanda, jeodezik amaçlı anten olan NovAtel 702 anteni ve düşük maliyetli anten olan u-blox ANN-MB-00-00 kullanılarak, aralarında yaklaşık 4 m mesafe olan iki noktada statik gözlem verileri toplanmıştır. Bu veriler VieVS (The Vienna VLBI and Satellite Software) tarafından sunulan oldukça kullanıcı-dostu olan raPPPid isimli GNSS PPP yazılımı ile değerlendirilmiştir (Glaner and Weber 2023). raPPPid yazılımı farklı kombinasyonlar kullanmaya izin verdiği için GPS, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+Galileo ve GPS+GLONASS+Galileo+ BDS-2 olmak üzere dört farklı kombinasyon seçilerek çözümler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana hedefi, düşük maliyetli GNSS alıcılarına bağlanan bu antenlerin çoklu-GNSS PPP performanslarının uydu yükseklik açısına ve C/NO'a bağlı ağırlıklandırma yaklaşımları ile araştırılmasıdır. Elde edilen bulgular neticesinden antenler için uygun ağırlıklandırma modeli hangisi olduğu ortaya konulmuş, bu antenlerden elde edilen yakınsama süreleri ve konumlama doğrulukları analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çoklu-GNSS PPP fonksiyonel modeli

Geleneksel çift frekanslı PPP metodunda, tek GNSS alıcısıyla, kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonları oluşturularak uygun kestirim teknikleri ile konumlama çözümleri sağlanır. Bu aşamada, global GNSS ağlarından üretilen hassas yörünge ve saat ürünleri kullanılır. İlk zamanlarda bu ürünler IGS (International GNSS Service) tarafından kullanıcılara sunulsa da, günümüzde pek çok Analiz Merkezi bu ürünleri ücretsiz olarak yayınlamaktadır (Birinci and Saka 2023). Hem bu ürünlerin hem de PPP üzerine yapılan çalışmaların daha da artması ve GLONASS, Galileo ve BDS gibi uydu takımlarına ait yeni uyduların da fırlatılması,

PPP'yi daha ilgi çekici hale getirmiştir. Öyle ki; IGS'in başlattığı MGEX (Multi-GNSS Experiment) projesi ile sadece GPS için değil tüm sistemler için de hassas ürünlerin üretilmesi hedeflenmiştir. 2017 yılında yapılan bir çalışmada çoklu-GNSS'nin hem görülen uydu sayısı, hem de geometriye sağladığı katkıya dikkat çekilmiş, yeni sistemlerin dahil edildiği uygulamalarda konumlama performansı arttığı ve yakınsama süresinin iyileştiğinin altı çizilmiştir (Montenbruck et al. 2017). Çoklu-GNSS'in getirdiği birçok fırsat olmasının yanında, tek sistem ile kıyaslandığında modelleme ilave bilinmeyenler ve stokastik modeldeki değişimler ile biraz farklılık göstermektedir. Bu kapsamda, kod ve faz gözlem eşitlikleri; GPS (Eşitlik 1 ve 2), GLONASS (Eşitlik 3 ve 4), Galileo (Eşitlik 5 ve 6) ve BDS (Eşitlik 7 ve 8) için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ZWD \cdot m_W(e)^{G,j} + \epsilon_{P_{IF,r}^{G,j}} \quad (1)$$

$$L_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ZWD \cdot m_W(e)^{G,j} + \lambda_{IF}^G \widetilde{N}_{IF}^{G,j} + \epsilon_{L_{IF,r}^{G,j}} \quad (2)$$

$$P_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ISB_G^R + ZWD \cdot m_W(e)^{R,j} + \epsilon_{P_{IF,r}^{R,j}} \quad (3)$$

$$L_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ISB_G^R + ZWD \cdot m_W(e)^{R,j} + \lambda_{IF}^R \widetilde{N}_{IF}^{R,j} + \epsilon_{L_{IF,r}^{R,j}} \quad (4)$$

$$P_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ISB_G^E + ZWD \cdot m_W(e)^{E,j} + \epsilon_{P_{IF,r}^{E,j}} \quad (5)$$

$$L_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ISB_G^E + ZWD \cdot m_W(e)^{E,j} + \lambda_{IF}^E \widetilde{N}_{IF}^{E,j} + \epsilon_{L_{IF,r}^{E,j}} \quad (6)$$

$$P_{IF,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ISB_G^C + ZWD \cdot m_W(e)^{C,j} + \epsilon_{P_{IF,r}^{C,j}} \quad (7)$$

$$L_{IF,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + c\widetilde{dt}_r^G + ISB_G^C + ZWD \cdot m_W(e)^{C,j} + \lambda_{IF}^C \widetilde{N}_{IF}^{C,j} + \epsilon_{L_{IF,r}^{C,j}} \quad (8)$$

Burada; üst indis G, R, E ve C sırasıyla GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydu sistemlerini, j ise uydu numarasını temsil etmektedir. Alt indis IF iyonosferden bağımsız kombinasyonu r ise alıcıyı temsil etmektedir. P ve L sırasıyla uydu saat hatası ve troposferin kuru kısmının düzeltildiği kod ve faz ölçüsü, ρ uydu ile alıcının anten faz merkezleri arasındaki geometrik mesafe, \widetilde{dt} alıcı kod donanım gecikmesini içeren alıcı saat hatası, ISB sistemler-arası fark, ZWD zenit ıslak troposferik gecikme, m_W ıslak kısım için izdüşüm fonksiyonu, e uydu yükseklik açısı, c ışığın boşluktaki yayılma hızıdır. λ ilgili frekansın dalga boyu, \tilde{N} tam sayı bilinmeyenidir. ϵ_P ve ϵ_L sırasıyla kod ve faz gözlemleri için çok yolluluk, yörünge hatası gibi değerleri içeren gözlem gürültüleridir. Ayrıca eşitlikte gösterilmemesine rağmen, anten faz kayıklıkları ve değişimleri, anten yüksekliği, gelgit etkileri (katı yeryuvarı, okyanus ve kutup gelgiti), taşıyıcı faz dönüklüğü (wind-up) etkisi, rölativistik etki gibi hata kaynakları da dikkate alınmalı ve var olan modeller ile düzeltilmelidir (Kouba and Héroux 2001).

Çoklu-GNSS fonksiyonel modelinde farklı uydu sistemleri için alıcı saat hatalarının olduğu ve model oluşturulurken bu durumun dikkate alınması gerektiği bilinmektedir. Bunun için literatürde genellikle iki teknik kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi tüm uydu sistemleri için farklı alıcı saat hatasının kestirimi, ikincisi referans bir zaman ölçeği tanımlayıp (genellikle GPS zamanı) diğer sistemler için ISB parametrelerinin kestirilmesidir (Liu *et al.* 2019). Sonuç olarak, çoklu GNSS için geleneksel PPP yönteminde kestirim yapılacak parametreler aşağıdaki gibi \mathbf{X} durum vektörü ile ifade edilebilir.

$$\mathbf{X} = [\mathbf{r}, \widetilde{dt}_r^G, ISB_G^R, ISB_G^E, ISB_G^C, ZWD, \tilde{N}_{IF}^G, \tilde{N}_{IF}^R, \tilde{N}_{IF}^E, \tilde{N}_{IF}^C] \quad (9)$$

Burada; \mathbf{r} vektörü alıcı koordinatlarına gelen düzeltmelerden oluşmaktadır. GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydu sistemlerinin dâhil olduğu çoklu-GNSS PPP çözüm adımı için serbestlik derecesi incelendiğinde; 2n tane gözlemin mevcut olduğu t anı için PPP çözümünde n adet tam sayı bilinmeyeni, 3 adet koordinat bilinmeyeni, 1 adet GPS için alıcı saat hatası ve diğer 3 sistem için 3 adet ISB terimi ve 1 adet ıslak kısım için ZWD parametresi olmak üzere toplam n+8 adet bilinmeyen bulunmaktadır.

2.2 Çoklu-GNSS PPP ağırlıklandırma modeli

PPP gözlem modelinde uygun modellemeler ile ilgili parametreler denklemden çıkarıldıktan sonra Eşitlik 9'da

görüldüğü üzere kestirim yapılması gereken parametreler ele alınmaktadır. Bu parametreler genellikle Kalman Filtresi veya Ardışık En Küçük Kareler yöntemleri ile kestirilmektedir. Kestirim adımı PPP yönteminin yüksek performans sergileyebilmesi, gözlemlerin uygun şekilde ağırlıklandırılması yani stokastik modellemenin doğru oluşturulmasıyla mümkündür. Özellikle bu ağırlıklandırma senaryoları üç başlık altında toplanabilir.

Birincisi; kod ve faz gözlemlerinin hassasiyetinin farklı olmasından dolayı PPP çözümlerinde doğru biçimde hassasiyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Genellikle kod gözlemlerinin hassasiyeti faz gözlemlerinden 100 kat daha az alınmaktadır (Abd Rabbou and El-Rabbany 2017, Kazmierski *et al.* 2018).

İkincisi; çoklu-GNSS uygulamalarında farklı uydu sistemleri gerek yörünge ve saat ürünleri doğruluğu gerek sinyal yapısı açısından ağırlıklandırma aşamasında dikkate alınmalıdır. Örneğin, diğer uydu sistemlerinden farklı olarak her uydusu için farklı frekansa sahip olan yani FDMA (Frequency Division Multiple Access) tekniğini kullanan GLONASS'ta kod gözlemlerinin içerdiği IFB (Inter-Frequency Bias) terimini göz ardı edebilmek için GLONASS kod gözlemlerinin ağırlığı modelde azaltılmaktadır (Cai and Gao 2013).

Üçüncüsü ise; uydulardan gelen sinyallerin kalitesinin farklı faktörlerden dolayı eşit olamayacağı aşikârdır. Bunun için uydular arasında da ağırlıklandırma PPP performansı için öneme sahiptir. Bu kapsamda; toplanan ölçülerden elde edilen ölçü gürültülerine bağlı olarak uygun ağırlık yaklaşımlarının belirlenmesi mümkündür. Ancak literatürde gerçekleştirilen pek çok çalışmada genel kabul görmüş ağırlık modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, yüksek kalitede jeodezik antenlerin kullanıldığı çalışmalarda genellikle uyduların yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma yapılmaktadır. Ancak düşük maliyetli antenler ve alıcı yonga setlerinde C/N0 tabanlı ağırlıklandırmaların stokastik modeli daha iyi yansıttığı yapılan deneysel çalışmalar ile gösterilmektedir (Li *et al.* 2023, Wang *et al.* 2021).

Bu çalışmada; farklı antenlere ait verilerin PPP çözümlerinde bu iki ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak, stokastik modellerin sağladığı konumlama performansları incelenmiştir. Bu yöntemlerden birincisi yükseklik açısına bağlı olarak oluşturulan yaklaşımdır. Model varyans-kovaryans matrisinin tersi olarak düşünüldüğünde bu matrisin köşegen elemanları aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2(e)} \quad (10)$$

burada σ_0 ilgili GNSS sisteminin kod ve faz gözlemlerinin standart sapması, e ise uydunun yükseklik açısını ifade etmektedir. Bu çalışmada uydu takımlarının kod ve faz gözlemleri için kullanılan standart sapma değerleri Çizelge 1’de verilmektedir.

ikinci yöntem ise C/N_0 tabanlı olarak seçilmiştir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir (Carcanague 2013, Wang *et al.* 2021).

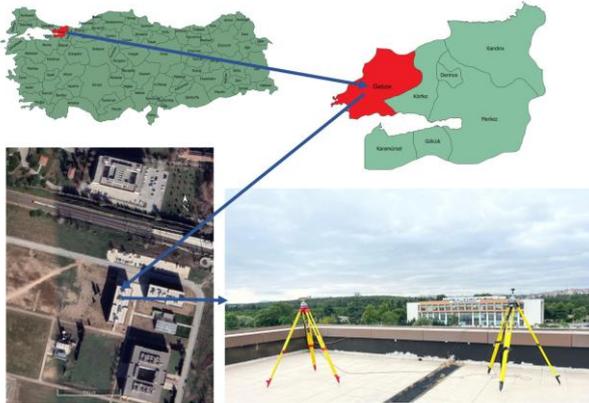
$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \times 10^{\frac{\max(55-C/N_0,0)}{10}} \quad (11)$$

burada, $C/N_0,0$ sinyalin C/N_0 değerini, max ise en büyük fonksiyonunu ifade etmektedir. Sonuç olarak; gözlemlerin ağırlık matrisi P aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_1^{-2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{2n}^{-2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.3 Çalışma bölgesi ve GNSS veri değerlendirme stratejisi

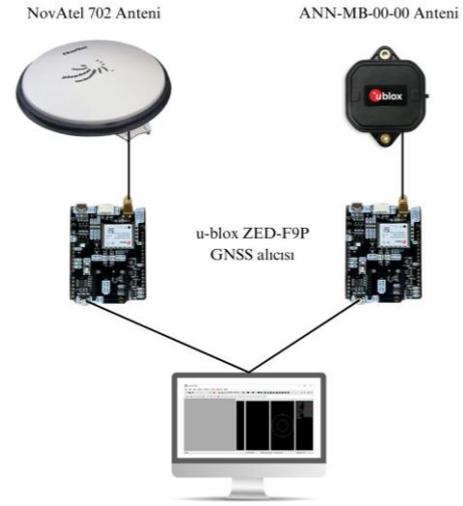
Bu çalışma kapsamında, GNSS verileri Gebze Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü Binası çatısında birbirine yakın mesafede olan iki nokta seçilerek toplanmıştır. Detaylı olarak incelenmek istendiğinde Şekil 1’de çalışma bölgesi ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Deneysel testlerin gerçekleştirildiği çalışma bölgesi.

Antenlerin performansını eşit şartlarda aynı zaman aralığında test etmek için bu noktaların birinde jeodezik tipte NovAtel 702 anteni, diğerinde ise u-blox ANN-MB-00-00 anteni kullanılmıştır. Bu antenler Şekil 2’de görüldüğü üzere düşük maliyetli u-blox ZED-F9P GNSS alıcılarına bağlanmıştır. Bu alıcı çift frekanslı GPS, GLONASS, Galileo, BDS gözlemlerini toplayabilme

yeteneğine sahiptir. Ek olarak belirtilmelidir ki, kullanılan donanımların BDS uydu takımı için kaydedebildiği ikinci frekans olan B2 sadece BDS-2 uydularında mevcuttur. Bundan dolayı, çalışmamızda çoklu-GNSS çözümlerinde BDS-2 uydularından faydalanılabilmektedir. U-blox GNSS alıcılarını konfigüre etmek ve değerlendirmek için geliştirilmiş olan u-center yazılımı aracılığıyla GNSS gözlemleri 10 saniye örneklem aralığında bilgisayara kaydedilmiştir (İnt. Kyn. 1).



Şekil 2. Test çalışmasında kullanılan donanımlar.

GNSS verileri 03.07.2023-08.07.2023 tarihleri arasında belirli saatlerde kaydedilmiştir. Toplanan gözlemler değerlendirilecek veri seti sayısının artırılması amacıyla 3 saatlik olacak biçimde bölünmüş, Şekil 3’ten de görüleceği üzere 24 adet veri seti elde edilmiştir. Satırlar ölçme tarihini, sütunlar ise ölçme gününe ait 3 saatlik aralıkları temsil etmektedir. Yeşil renkli 3 saatlik aralıklar GNSS verisinin o aralıkta mevcut olduğunu, diğer renk ise mevcut olmadığını göstermektedir.



Şekil 3. Veri setlerinin tarih ve saatleri.

Bu çalışmada toplanan 10 saniye örneklem aralığına sahip GNSS verileri VieVS tarafından kullanıma sunulan raPPPId GNSS PPP yazılımı ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme aşamasında CODE (The Center for Orbit Determination in Europe)’nin hassas yörünge ve saat ürünleri kullanılmıştır. PPP çözümleri GPS (G), GPS+GLONASS (GR), GPS+GLONASS + Galileo (GRE), GPS + GLONASS +Galileo+BDS-2 (GREC) olmak üzere dört farklı kombinasyonla gerçekleştirilmiştir. Stokastik

modellemede kullanılan kod gözlemlerinin standart sapması 1 m, faz gözlemlerinin ki ise 0.01 m olarak ayarlanmıştır (Hohensinn *et al.* 2022). GLONASS uydu takımının önceki bölümde bahsedilen nedenlerden ve frekans yapısından dolayı standart sapmaları iki kat olacak şekilde belirlenmiştir (Pan and Guo 2018), (Nie *et al.* 2020). Ayrıca belirtilmelidir ki, gözlemler için gerçekleştirilecek gürültü analizleri neticesinde kod ve faz gözlemlerine ait standart sapma değerleri elde edilebilir ve bu değerlere göre de çözümler sağlanabilir. Ancak bu çalışmada genel kabul görmüş standart sapma değerleri kullanılmıştır. Yükseklik açısı sınır değeri 10° , C/N0 sınır değeri ise 20 dB-Hz olarak ayarlanmıştır. Birinci dereceden iyonosferik gecikme çift frekanslı gözlemlerin iyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonu ile giderilmiştir. Troposferin hem ıslak hem de kuru kısmı için VMF-3 (Vienna Mapping Functions-3) modeli kullanılmıştır (Landskron and Böhm 2018). Bu çalışmadaki değerlendirme stratejisinin detaylı hali Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. GNSS verilerinin değerlendirilme stratejisi.

Yazılım	raPPPid
Gözlemler	IF gözlemleri: GPS (L1/L2), GLONASS (G1/G2), Galileo (E1/E5b), BDS-2 (B1/B2)
Örneklem Aralığı	10 saniye
Uydu Yükseklik Açısı ve C/N0 Sınır Değerleri	10° , 20 dB-Hz
Ağırlıklandırma Modelleri	Uydu Yükseklik açısı C/N0
Kod Gözlemlerinin Standart Sapması	G= 1 m, R= 2 m, E= 1 m, C= 1 m,
Faz Gözlemlerinin Standart Sapması	G= 0,01 m, R= 0,02 m, E= 0,01 m, C= 0,01 m
Kestirim Yöntemi	Kalman Filtresi
Yörünge ve Saat Ürünleri	CODE hassas ürünleri
Birinci Dereceden İyonosferik Gecikme	IF kombinasyonu
Troposfer	VMF-3
Diferansiyel Kod Bias (DCB)	CAS ürünleri
Uydu ve Alıcı Anten Faz Merkezi Kayıklığı	igs20_2247.atx
Katı Yeryuvarı Gelgiti	Düzeltildi
Faz Dönüklüğü	Düzeltildi

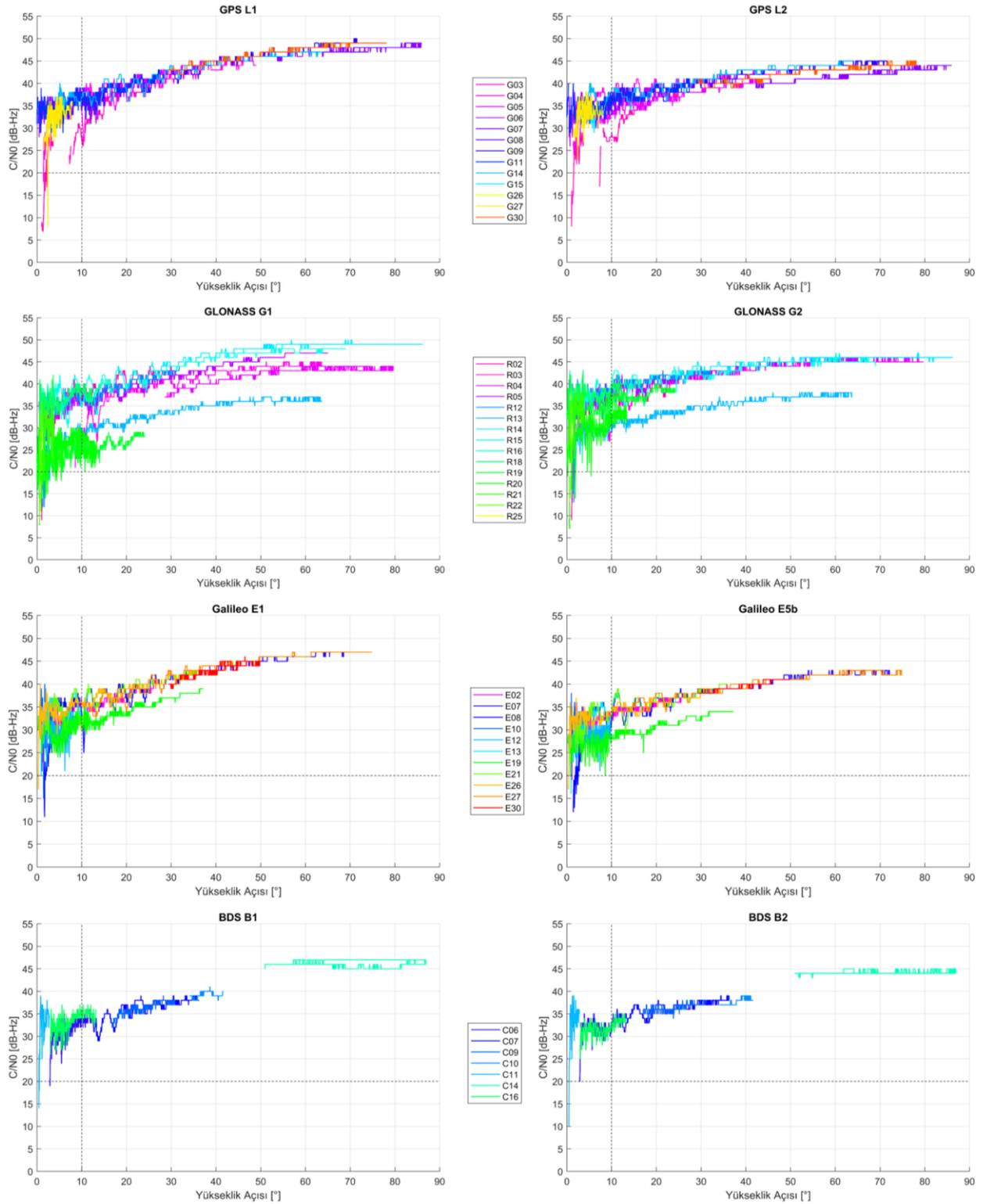
3. Bulgular

Bu çalışmada, hem düşük maliyetli GNSS alıcılarının konumlama performansı hem de jeodezik ve düşük maliyetli GNSS antenlerine ilişkin toplanan verilerin değerlendirilmesinde uygun stokastik modelinin araştırılması amaçlanmıştır. Farklı GNSS kombinasyonlarıyla düşük maliyetli donanımların PPP çözümlerinde hem yakınsama süresi hem de doğruluk kriterlerine çoklu-GNSS’in katkısının detaylıca ele alınması

sağlanmıştır. Her bir kombinasyon iki farklı ağırlıklandırma modeli kullanılarak çözülmüştür. Tüm kombinasyonlardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek farklı antenlerden toplanan veriler için hangi modelin daha verimli olduğu ortaya konulmuştur. Özetlenecek olursa, bir GNSS anteni için toplam 192 adet çözüm sağlanmış olup, analizlerde bu sonuçların ortalamaları dikkate alınarak çalışmanın bulguları sunulmuştur. Konumlama performansı ve yakınsama süresi ile ilgili değerlendirmeden önce, farklı antenlerin C/N0 değerlerinin yükseklik açısı ile olan ilişkisini gösterilebilmesi için 04.07.2023 tarihindeki 18-21 saatleri arasındaki veri seti örnek olarak seçilmiştir. Bu örnek veri setinde kullanılan uyduların yükseklik açılarına karşılık kaydedilen C/N0 değerleri Şekil 4’te gösterilmektedir.

C/N0, 1 Hz bant genişliğindeki sinyal gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Kısaca enerji açısından GNSS alıcısının aldığı sinyalin bir kalite ölçütüdür (Bilich and Larson 2007). NovAtel 702 anteni için toplanan GPS, GLONASS, Galileo ve BDS-2 gözlemlerinin C/N0 değerleri arasında bazı küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. L1 frekansı için değerlendirme yapılacak olursa, yükseklik açısı 50° ’yi geçtikten sonra GPS ve Galileo uydularının C/N0 değerleri 45-50 dB-Hz arasında değişmektedir. Ancak GLONASS için bu durumu sağlamayan bazı uydular bulunmaktadır. BDS-2’de bu durum geçerli olsa da yeterince uydu olmaması sağlıklı yorum yapmayı engellemektedir. Ayrıca Şekil 4’e bakıldığında tüm uydu sistemleri için yükseklik açısı ile C/N0 arasında güçlü bir korelasyonun olduğu söylenebilir. Özellikle yükseklik açısı 30° ’den büyük olduğunda, yükseklik açısının artmasıyla birlikte C/N0 değerlerinin dalgalanmalar göstermeyerek arttığı açıkça görülmektedir. Aynı şekilde ikinci frekans için ele alındığında 50° ’den sonra GPS, GLONASS ve BDS-2 sistemlerinde 40-45 dB-Hz arası C/N0 değerleri kaydedilmiştir. L1 frekansı ile kıyaslandığında yaklaşık 5 dB-Hz bir azalma görülmektedir. L1 frekansı için yüksek kaydedilen C/N0 değerinden dolayı gürültüye direnç göstermede daha başarılı olduğu söylenebilir.

Düşük maliyetli u-blox ANN-MB-00-00 anteni için C/N0 yükseklik açısı arasındaki ilişki Şekil 5’te gösterilmektedir. NovAtel 702 anteni ile kıyaslandığında L1 frekansında GPS, GLONASS ve Galileo gözlemlerinin neredeyse tamamı için 20° yükseklik açısından sonra C/N0 değerleri 30-45 dB-Hz arasında değişmektedir. BDS-2 için ise NovAtel 702 anteninde kaydedilen 45-50 dB-Hz değerleri u-blox ANN-MB-00-00 anteninde ciddi şekilde azalarak 25-42 dB-Hz seviyelerine düşmüştür.

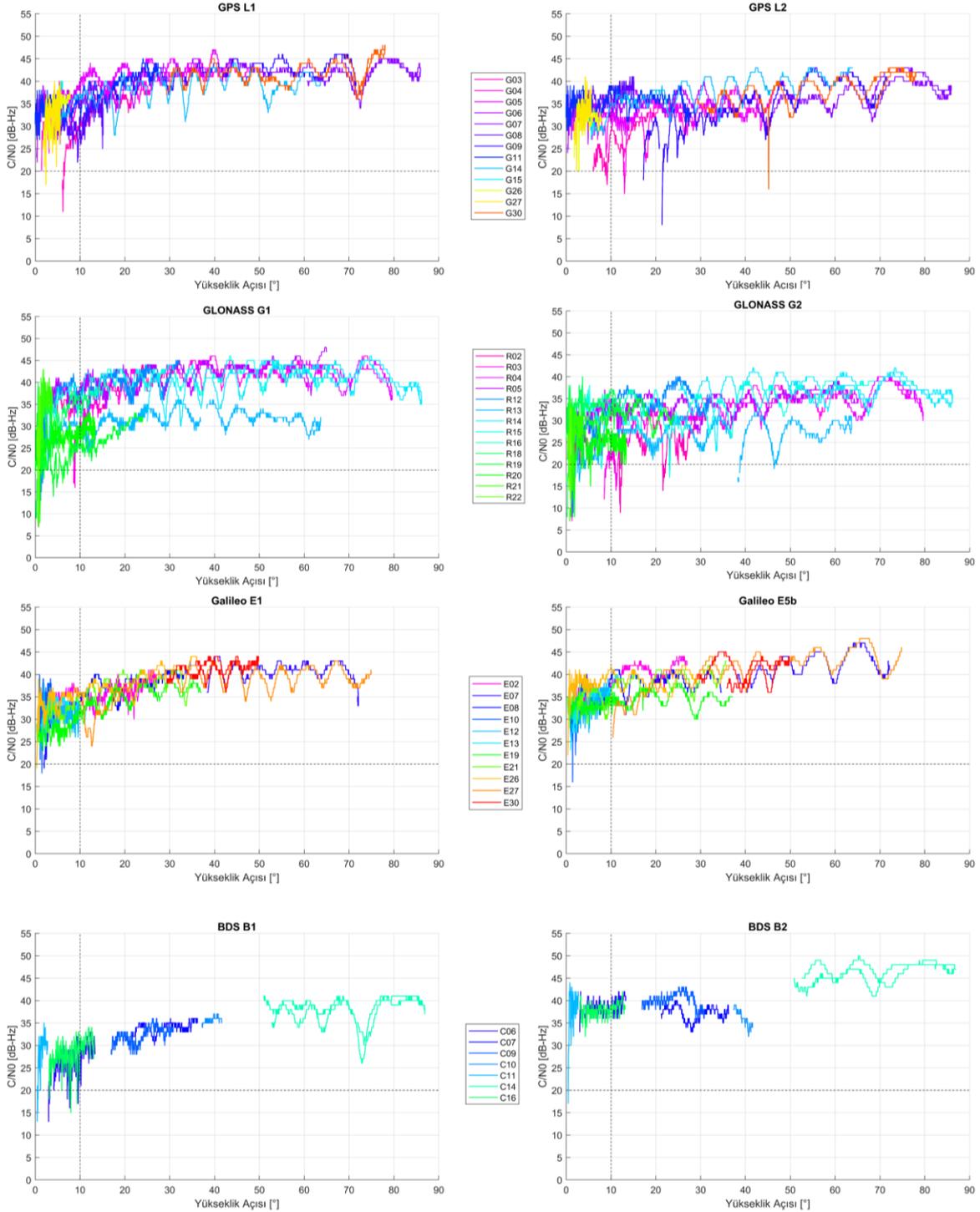


Şekil 4. GPS, GLONASS, Galileo ve BDS-2 için NovAtel 702 anteninde kaydedilen C/N0 değerlerinin uydu yükseklik açısıyla olan ilişkisi.

İkinci frekans incelendiğinde, GPS ve GLONASS'ta C/N0 aralığının arttığı, bazı uydular için yükseklik açısı kesme sınırından sonra 25 dB-Hz den küçük değerler kaydedildiği görülmüştür. Ayrıca ikinci frekanslarda ortalama olarak C/N0 değerlerinin azaldığı söylenebilir. Galileo için ise E5b frekansında 45-50 dB-Hz değerleri varken E1 frekansından tüm değerler 45 dB-Hz den küçüktür. BDS-2 uydu

sisteminde B2 frekansında B1'e kıyasla daha yüksek C/N0 değerleri kaydedilmiştir.

Genel olarak ifade edilecek olursa, u-blox antenin kaydettiği C/N0 değerleri NovAtel antenine göre yaklaşık olarak 7-8 dB-Hz azalmıştır. Ayrıca uydu yükseklik açısı ile C/N0 arasındaki ilişki, NovAtel antenindeki gibi güçlü değildir.

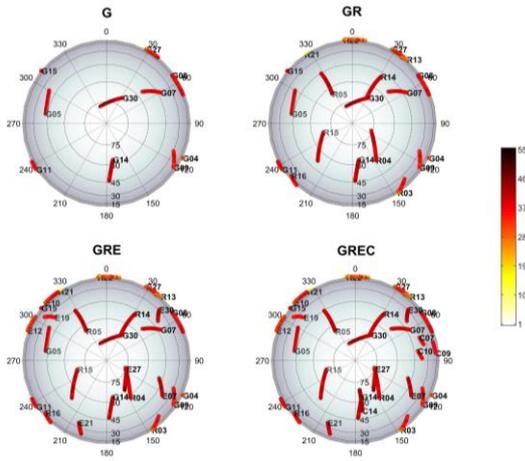


Şekil 5. GPS, GLONASS, Galileo ve BDS-2 için u-blox ANN-MB-00-00 anteninde kaydedilen C/N0 değerlerinin uydu yükseklik açısıyla olan ilişkisi.

Genel bir gidişattan ziyade ciddi boyutta dalgalanmalar görülmektedir. Öyle ki, 60° yükseklik açısına sahip bir uydunun C/N0 değeri, 65°'dekinden daha yüksek, 70° ile aynı değere sahip olabilmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda özellikle u-blox ANN-MB-00-00 anteni için klasik olarak kullanılan yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma modelinin çok uygun olmadığı söylenebilir.

PPP yönteminin en önemli dezavantajı olan yakınsama süresinin azaltılmasında görülen uydu sayısı önemli rol oynamaktadır. Özellikle; çözümün başlangıcında kullanılan uydu sayısının fazla olması, uydu geometrisini iyileştirerek, çözümün daha güvenilir ve hassasiyetinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, kestirilen parametreler daha hızlı bir biçimde gerçek değerlerine ulaşarak yakınsama süresi kısalmaktadır. Çalışmamızda

kullanılan kombinasyonlardan elde edilen uydu gökyüzü grafiği örnek seçilen veri seti için Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu grafik, ek olarak uydunun C/N0 değerlerini de göstermektedir. Her iki anten için de hemen hemen aynı gözlemler toplandığından şekil sadece u-blox ANN-MB-00-00 anteni ile toplanan gözlemler için çizdirilmiştir. Tekli-GPS ile GREC çözümü ele alındığında uydu sayısındaki önemli artışın geometriye olumlu katkı sağladığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, düşük maliyetli donanımlardaki yüksek gürültülü gözlemler düşünüldüğünde, uydu sayısının artmasıyla ağırlıklandırma yöntemlerinin etkisinin çözümlere yansımaları beklenmektedir.



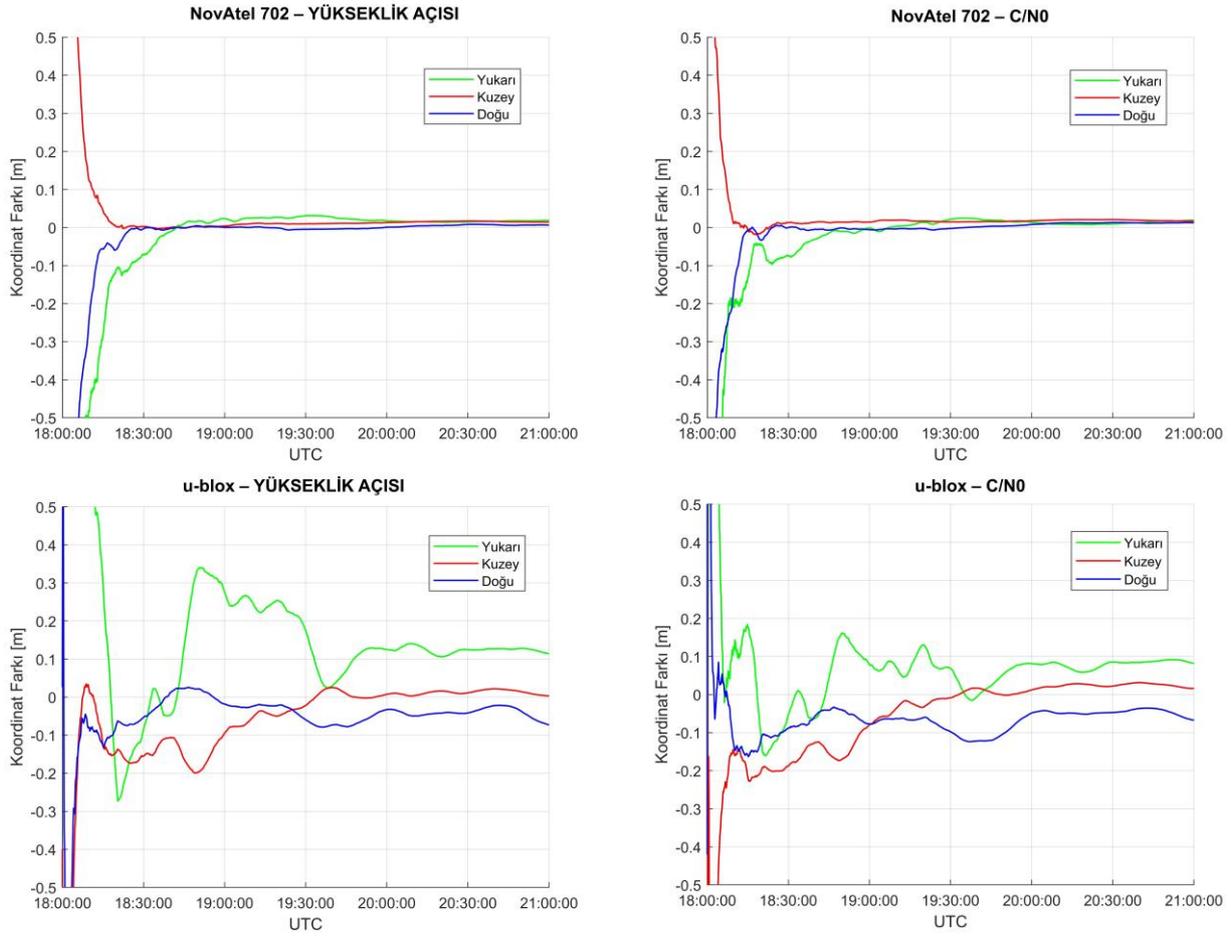
Şekil 6. 04.07.2023 18.00-21.00 saatleri arasında seçilen kombinasyonlar için uydu gökyüzü grafiği.

Literatür incelendiğinde, doğruluk değerlendirmesi için ilk olarak yakınsama süresi tespit edilmektedir. Bu yakınsama süresi belli bir sınır değere göre belirlenir. Noktanın gerçek koordinatı ile PPP çözümünde her bir ölçme anı için elde edilen koordinatların farkı alınarak bu sınır değeri ile karşılaştırılır. Eğer fark sınır değerinin altına düşüp, sonrasında bu değer üzerine çıkmıyorsa ilgili ölçme anında yakınsamanın gerçekleştiği kabul edilmektedir. Bu ana kadar geçen süreye de yakınsama süresi denilmektedir. Pek çok çalışmada yakınsama için sınır değer 3 boyutta 10 cm olarak alınmaktadır. Ancak farklı değerlendirme prosedürleri ve donanımların kalitesine bağlı olarak bu değer değişiklik gösterebilmektedir. Çalışmamızda ise yakınsama için sınır değer 3 boyutta 15 cm olarak alınmıştır. Yakınsamadan sonra elde edilen çözümlerinde karesel ortalama hatası doğruluk olarak ele alınmaktadır. Test düzeneğinin önemli adımlarından biri, iki noktaya ait koordinatların çok hassas olarak bilinmesi veya belirlenmesidir. Bunun için bu noktalarda yüksek hassasiyetli jeodezik alıcı ve anteni (CHC-I80) ile yaklaşık 10 saatlik ölçü toplanmıştır. Bu veriler de GipsyX akademik yazılımı kullanarak PPP çözümüne tabi tutulmuştur. GipsyX'ten elde edilen PPP

sonuçları noktaların kesin koordinatları olarak kabul edilmiş ve analizler bu koordinatlara göre gerçekleştirilmiştir (Bertiger *et al.* 2020). Örnek teşkil etmesi açısından, daha önce bahsedilen iki noktaya ait 3 saatlik veri setinin GREC kombinasyonunun her iki ağırlıklandırma yöntemine göre elde edilen PPP çözümleri Şekil 7'de sunulmaktadır.

Şekil 7 incelendiğinde NovAtel 702 anteninde iki ağırlıklandırma yöntemiyle de elde edilen konumlama performansı arasında gözle görülebilir bir fark bulunmamaktadır. Ek olarak belirtilmelidir ki, düşük maliyetli ZED-F9P alıcısına bağlanan NovAtel 702 anteni ile yaklaşık 30 dakikadan kısa bir süre içerisinde her bir bileşen için 10 cm'den daha iyi konumlama çözümü sağlanmıştır. Aynı alıcıya düşük maliyetli u-blox ANN-MB-00-00 anteni bağlandığında ise konumlama performansının düştüğü çok açık bir biçimde görülmektedir. Özellikle yükseklik açısına bağlı olan ağırlıklandırmada yükseklik bileşenindeki dalgalanmalar daha fazladır. Ancak C/N0'a bağlı ağırlıklandırmanın çözümlere olumlu anlamda katkı yaptığı görülmektedir. Yükseklik açısına göre ağırlıklandırma sonuçlarında tüm bileşenlerin 10 cm'den daha iyi olduğu bir zaman bulunmazken, C/N0'a göre ağırlıklandırmada yaklaşık 100 dakika sonra tüm bileşenler için bu şartın sağlandığı görülmektedir.

NovAtel 702 anteninde elde edilen gözlemlerin PPP çözümlerinin ortalama yakınsama süresi ve konumlama doğruluğu Çizelge 2'de verilmektedir. Yakınsama süresi açısından incelendiğinde GPS'e ek olarak GLONASS ve diğer uydu sistemlerinin kullanılması sonuçlara ciddi anlamda katkı sağlamıştır. Yükseklik açısına göre ağırlıklandırmada tekli-GPS ile kıyaslandığında, yakınsama süreleri GR çözümü ile %52, GRE çözümü ile %63, GREC çözümü ile %61 iyileşme göstermiştir. C/N0'a göre ağırlıklandırma da ise tekli-GPS yakınsama süresi GR kombinasyonu ile %43, GRE ile %63, GREC ile %61 iyileşmiştir. İki ağırlıklandırma yöntemiyle elde edilen yakınsama süreleri birbirine yakın olduğundan iyileştirme oranları da benzerlik göstermektedir. Doğruluk açısından irdelendiğinde, yöntemler arasında anlamlı farkların olduğunu söylemek pek mümkün değildir. Ancak her iki yöntemde de çoklu-GNSS ile konumlama doğruluğunun küçük de olsa iyileştiği görülmektedir. Son olarak düşük maliyetli bir GNSS alıcısı ile yaklaşık olarak yatay bileşende 3 cm ve düşey bileşende 6 cm olarak elde edilen konumlama performansı çok ilgi çekicidir. Çoklu-GNSS kullanımı ile bu doğruluğun yaklaşık 20 dakikalık yakınsama süresine ihtiyacı olmasının da ayrıca altı çizilmelidir.



Şekil 7. Kullanılan antenler ve ağırlıklandırma modellerine göre örnek veri setinin üç bileşen için PPP konumlama doğrulukları.

Çizelge 2. NovAtel 702 anteninin PPP sonuçlarından elde edilen ortalama yakınsama süresi ve konumlama doğrulukları.

Kombinasyonlar	Yükseklik Açısına Göre Ağırlıklandırma				C/N0'a Göre Ağırlıklandırma			
	G	GR	GRE	GREC	G	GR	GRE	GREC
Yakınsama Süresi (dk)	52,29	25,17	19,42	20,21	48,83	27,79	18,21	19,17
Kuzey (cm)	1,60	1,35	1,48	1,43	1,70	1,47	1,53	1,45
Doğu (cm)	3,25	2,51	2,44	2,46	3,65	2,76	2,61	2,55
Yukarı (cm)	6,04	5,45	5,68	5,79	6,31	5,98	5,96	6,03
3 Boyut (cm)	7,38	6,40	6,60	6,67	7,83	6,98	6,92	6,92

Çizelge 3. U-blox ANN-MB-00-00 anteninin PPP sonuçlarından elde edilen ortalama yakınsama süresi ve konumlama doğrulukları.

Kombinasyonlar	Yükseklik Açısına Göre Ağırlıklandırma				C/N0'a Göre Ağırlıklandırma			
	G	GR	GRE	GREC	G	GR	GRE	GREC
Yakınsama Süresi (dk.)	95,40	89,05	83,55	76,67	100,00	75,59	66,77	66,36
Kuzey (cm)	1,95	1,90	1,97	1,79	2,76	2,34	2,00	1,97
Doğu (cm)	5,06	4,32	4,15	3,85	5,62	3,60	4,08	3,96
Yukarı (cm)	7,05	8,29	8,07	7,88	5,72	7,81	6,94	6,87
3 Boyut (cm)	9,35	9,91	9,60	9,25	9,22	9,30	8,54	8,42

U-blox ANN-MB-00-00 anteninden elde edilen gözlemlerin PPP çözümlerinin ortalama yakınsama süresi ve konumlama doğruluğu Çizelge 3'te verilmektedir. İlk olarak, iki antenin yakınsama süreleri bakımından ciddi bir performans farkına sahip olduğu belirtilmelidir. Bu anten, NovAtel 702 antenine göre tekli-GPS çözümünde yaklaşık 2 kat, çoklu GNSS çözümlerinde ise yaklaşık 3-4 kat daha fazla yakınsama süresine sahiptir. Doğruluk kriteri ele alınırsa u-blox ANN-MB-00-00 anteni daha düşük doğruluğa sahiptir. NovAtel 702 anteni, u-blox ANN-MB-00-00 anteninden tüm çözümlerin ortalaması alındığında 3 boyutta yaklaşık olarak %24 daha iyi konumlama performansı sergilemiştir.

U-blox ANN-MB-00-00 anteninin sonuçları irdelendiğinde çoklu-GNSS kullanımının yakınsama süresine olumlu etki ettiği görülmektedir. Ancak en önemli bulgulardan birisi NovAtel 702 anteni sonuçlarında, yakınsama süresi iki ağırlıklandırma yönteminde birbirine yakınken u-blox ANN-MB-00-00 anteni için bu durum geçerli değildir. Tekli-GPS sonuçlarının haricinde, diğer tüm çözümlerde C/N0 ağırlıklandırma modeli hem yakınsama süresi hem de konum doğruluğu açısından uydu yükseklik açısı ağırlıklandırma modelinden daha iyi performans sergilemiştir. Kıyaslama yapılacak olursa, C/N0'a göre ağırlıklandırma ile GR çözümü %15, GRE çözümü %20, GREC çözümü ise %13 iyileşmiştir. Konumlama doğruluğunda ise C/N0'a göre ağırlıklandırma biraz daha iyi sonuçlar üretmiştir. Ek olarak u-blox anteni sonuçlarında yakınsama şartını sağlamayan bazı çözümler meydana gelmiştir. Yükseklik açısına göre ağırlıklandırmada tekli-GPS çözümlerinden 9 tanesinde çözüm sağlanamazken, C/N0'a göre ağırlıklandırmada 7 tanesinde sağlanamamıştır. Diğer kombinasyonlar için ise bu sayı daha düşüktür. Yükseklik açısına göre ağırlıklandırmada GR, GRE ve GREC kombinasyonlarında sırasıyla şartı sağlanamayan çözüm sayısı 3, 2 ve 3'tür. C/N0'a göre aynı sırada şartı sağlamayan çözüm sayısı 2, 2 ve 2'dir. Bu değerler de uygun ağırlık modeli seçiminin etkisini göstermektedir. Sonuç olarak, düşük maliyetli bir anten kullanımında yükseklik açısına göre ağırlıklandırma yerine C/N0'a göre ağırlıklandırmanın tercih edilmesinin daha uygun olduğu söylenebilir. Ayrıca 3 saatlik veri setleri ve çoklu-GNSS kullanımı ile düşük maliyetli anten ve alıcı kullanılarak yaklaşık 70 dakikalık bir yakınsama süresi sonrası yatayda 4,5 cm ve düşeyde 7 cm konumlama doğruluğu elde edilmiştir. 3 boyutta elde edilen yaklaşık 8,5 cm'lik doğruluk, yüksek maliyetli hassas jeodezik alıcılardan elde edilen konumlama doğruluğundan düşük olsa da desimetre-altı mertebesinde konumlama ihtiyacını karşılamaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte uydu tabanlı konumlama sistemleri için kullanılan donanımlarda önemli ilerleme kat edilmiştir. Öncesinde sadece yüksek hassasiyetli GNSS donanımlarında çift frekanslı gözlemler elde edilebiliyorken, güncel durum itibarıyla düşük maliyetli GNSS donanımları veya akıllı telefonlar ile de çift frekanslı gözlemler toplanabilmektedir. Bu önemli gelişmelerin paralelinde konumlama teknikleri arasında son 25 yıldır etkili şekilde kullanımı yaygınlaşan PPP tekniği de harici alıcılara bağımlılığı ortadan kaldırarak tek bir GNSS alıcısı ile çift frekanslı gözlemler kullanılarak cm mertebesinde konumlama doğruluğu sağlamaktadır. Bu durum neticesinde düşük maliyetli GNSS donanımları ile PPP uygulamalarının gerçekleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. PPP yönteminde elde edilmek istenen konumlama doğruluğu için belli bir yakınsama süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Hem bu sürenin azaltılması hem de konumlama doğruluğunun artırılması için GPS uydu sisteminin yanında diğer uydu sistemleri olan GLONASS, Galileo ve BDS'nin aktif olarak kullanımı düşük maliyetli alıcılar için çoklu-GNSS ile PPP uygulamalarının önünü açmıştır. Ancak bir jeodezik alıcı ile kıyaslandığında, çok yolluluk etkisine karşı duyarlı olması ve donanımsal tasarımı ele alındığında daha yüksek gürültülü gözlemler içermesinden ötürü düşük maliyetli donanımlar için değerlendirme stratejisinde farklı ağırlıklandırma modellerinin ele alınması gereklidir. Değerlendirme sırasında ölçülerin modeldeki ağırlıklarını gerçekçi bir biçimde tanımlamak çözüm performansını arttırmaktadır.

Bu çalışmada düşük maliyetli ZED-F9P GNSS alıcısına jeodezik anten olan NovAtel 702 anteni ile düşük maliyetli bir anten olan u-blox ANN-MB-00-00 antenleri bağlanmıştır. Bu antenlerin statik PPP performanslarının araştırılması için elde edilen veri seti raPPPid yazılımı ile G, GR, GRE ve GREC olmak üzere dört farklı GNSS kombinasyonu şeklinde değerlendirilmiştir. Tüm kombinasyonlar uygun ağırlıklandırma modelinin araştırılması için uydu yükseklik açısına ve C/N0 değerlerine göre iki farklı ağırlıklandırma yöntemiyle çözülmüştür. İlk olarak NovAtel 702 anteni çözümleri, ağırlıklandırma açısından analiz edildiğinde, uydu yükseklik açısı ile C/N0 yaklaşımları arasında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Hem yakınsama süresi hem de konumlama doğruluğu açısından bakıldığında iki ağırlıklandırma yöntemi arasında anlamlı farkların olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak çoklu-GNSS kullanımı ile yakınsama süresinde önemli gelişmeler olduğu görülmüştür. Tekli-GPS çözümüne kıyasla iki ağırlıklandırma yöntemine göre de GREC kombinasyonu

ile yakınsama süresinde %61'lik bir iyileşmenin olduğu bulunmuştur. Ayrıca NovAtel 702 anteni ile GREC kombinasyonu uydu yükseklik açısına göre ağırlıklandırıldığında 3 boyutta 6,67 cm doğruluk, C/NO'a göre ağırlıklandırıldığında ise 6,92 cm konumlama doğruluğu tespit edilmiştir. U-blox ANN-MB-00-00 anteni sonuçlarını incelendiğinde ise sonuçların NovAtel 702 antenin gerisinde olduğu belirtilmelidir. Ek olarak, Novatel 702 antenine ait tüm çözümler yakınsama şartını sağlarken u-blox ANN-MB-00-00 anteninde ise çözümlerin %16'sı bu şartı sağlayamamıştır. Tüm kombinasyon sonuçlarına göre uydu yükseklik açısına göre ağırlıklandırmada 17 çözüm, C/NO'a göre ise 13 çözüm yakınsama sınırı şartına takılmıştır. Ancak şartı sağlayan çözümlerin ortalaması incelendiğinde ağırlıklandırma modelleri arasında farkların olduğu tespit edilmiştir. Tekli-GPS çözümü haricinde C/NO'a bağlı ağırlık modelinin çoklu kombinasyon çözümlerinin yakınsama sürelerinin daha kısa olduğu bulgular kısmında raporlanmıştır. Öyle ki, uydu yükseklik açısıyla kıyaslandığında, C/NO'a göre ağırlıklandırma ortalama olarak yakınsama süresini %16 iyileştirmiştir. Bu anlamda en iyi sonucu 66,36 dakikayla GREC kombinasyonu vermiştir. 3 boyutta konumlama doğruluğu ele alındığında, yükseklik açısına göre ağırlıklandırmada en iyi çözümü 9,25 cm doğrulukla GREC çözümü verirken, C/NO'a göre ise 8,42 cm doğruluk ile yine aynı kombinasyon vermiştir. Böylelikle C/NO ağırlıklandırma modeli ile yaklaşık olarak konumlama doğruluğunda %9 iyileşme elde edilmiştir. Çoklu-GNSS kullanımı ve ölçülerin uygun ağırlıklandırması gerçekleştirildiğinde, 3 saatlik veri setlerinin PPP çözümlerinin ortalamalarından elde edilen desimetre-altı doğruluk ile düşük maliyetli alıcı ve antenlerin jeodezik donanımlara ciddi bir alternatif sağladığının altı çizilmelidir. Ayrıca küresel bir uydu sistemi olan BDS-3'ün de kullanıldığı deneysel çalışmalarda sonuçların iyileşeceği düşünülmektedir. Gözlemlerin stokastik modellemesinin varyans bileşen kestirim teknikleriyle oluşturulmasının da çözümlere katkı sağlayacağı ve araştırılmaya değer bir konu olduğu belirtilmelidir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Metodoloji/Çalışma, Araştırma, Analiz ve yorumlama, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak
Yazar 2: Deney, Araştırma, Görselleştirme, Analiz ve yorumlama, Yazma/inceleme ve düzenleme
Yazar 3: Araştırma, Deney, Yazılım, Veri iyileştirme, Görselleştirme
Yazar 4: Araştırma, Deney, Yazılım, Veri iyileştirme, Görselleştirme
Yazar 5: Araştırma, Deney, Yazılım, Veri iyileştirme, Görselleştirme
Yazar 6: Denetleme/danışmanlık, Doğrulama, Kaynak sağlama, Yazma/inceleme ve düzenleme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Mevcut çalışma sırasında toplanan ve analiz edilen GNSS veri seti, makul bir talep üzerine sorumlu yazardan temin edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmada, raPPPid yazılımı geliştiricilerine, NASA/JPL'e, ürünlerinden faydalandığımız Center for Orbit Determination in Europe (CODE) ve Chinese Academy of Sciences (CAS)'a teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Abd Rabbou, M., El-Rabbany, A., 2017. Performance analysis of precise point positioning using multi-constellation GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Survey Review*, **49(352)**, 39–50.
<https://doi.org/10.1080/00396265.2015.1108068>
- Alkan, R.M., Saka, M.H., Ozulu, I.M., Ilci, V., 2017. Kinematic precise point positioning using GPS and GLONASS measurements in marine environments, *Measurement*, **109**, 36-43.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.054>
- Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., Heflin, M., Lu, W., Miller, M., Moore, A. W., Murphy, D., Ries, P., Romans, L., Sibois, A., Sibthorpe, A., Szilagyi, B., Vallisneri, M., Willis, P., 2020. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research*, **66(3)**, 469–489.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015>
- Bezcioglu, M., 2023. Düşük Maliyetli GNSS Gözlemlerine Dayalı Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) Tekniğinin Performansının Değerlendirilmesi ve Çoklu-GNSS Gözlemlerinin Katkısı. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **12(4)**, 1341-1350.
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1310577>
- Bezcioglu, M., Yiğit, C.Ö., Bodur, M.N., 2019. Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, **19(1)**, 162–169.
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>
- Bilich, A., Larson, K.M., 2007. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). *Radio Science*, **42(6)**.
<https://doi.org/10.1029/2007RS003652>
- Birinci, S., Saka, M.H., 2023. Sub-meter-level navigation with an enhanced multi-GNSS single-point positioning

- algorithm using iGMAS ultra-rapid products. *Journal of Navigation*, **76(1)**, 133–151.
<https://doi.org/10.1017/S0373463322000601>
- Cai, C., Gao, Y., 2013. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS Solutions*, **17(2)**, 223–236.
<https://doi.org/10.1007/s10291-012-0273-9>
- Carcanague, S., 2013. Low-cost GPS/GLONASS Precise Positioning Algorithm in Constrained Environment, PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 200.
- Chen, J., Zhao, X., Liu, C., Zhu, S., Liu, Z., Yue, D., 2021. Evaluating the Latest Performance of Precise Point Positioning in Multi-GNSS/RNSS: GPS, GLONASS, BDS, Galileo and QZSS. *Journal of Navigation*, **74(1)**, 247–267.
<https://doi.org/10.1017/S0373463320000508>
- Elmezayen, A., El-Rabbany, A., 2021. Performance Assessment of Real-Time Multiconstellation GNSS PPP Using a Low-Cost Dual-Frequency GNSS Module. *Artificial Satellites*, **56(3)**, 37–56.
<https://doi.org/10.2478/arsa-2021-0005>
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., Liu, J., 2008. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal Of Geodesy*, **82**, 389–399.
<https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>
- Glaner, M.F., Weber, R., 2023. An open-source software package for Precise Point Positioning: raPPPid. *GPS Solutions*, **27(4)**, 174.
<https://doi.org/10.1007/s10291-023-01488-4>
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., 2021. Testing the Performance of Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers and Antennas. *Sensors*, **21(6)**, 2029.
<https://doi.org/10.3390/s21062029>
- Hohensinn, R., Stauffer, R., Glaner, M. F., Herrera Pinzón, I.D., Vuadens, E., Rossi, Y., Clinton, J., Rothacher, M., 2022. Low-Cost GNSS and Real-Time PPP: Assessing the Precision of the u-blox ZED-F9P for Kinematic Monitoring Applications. *Remote Sensing*, **14(20)**, 5100.
<https://doi.org/10.3390/rs14205100>
- Kazmierski, K., Hadas, T., Sońnica, K., 2018. Weighting of Multi-GNSS Observations in Real-Time Precise Point Positioning. *Remote Sensing*, **10(2)**, 84.
<https://doi.org/10.3390/rs10010084>
- Kouba, J., Héroux, P., 2001. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, **5(2)**, 12–28.
<https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Landskron, D., Böhm, J., 2018. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, **92(4)**, 349–360.
<https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- Li, B., Lou, L., Shen, Y., 2016. GNSS Elevation-Dependent Stochastic Modeling and Its Impacts on the Statistic Testing. *Journal of Surveying Engineering*, **142(2)**, 1–7.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000156](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000156)
- Li, X., Gou, H., Li, X., Shen, Z., Lyu, H., Zhou, Y., Wang, H., Zhang, Q., 2023. Performance analysis of frequency-mixed PPP-RTK using low-cost GNSS chipset with different antenna configurations. *Satellite Navigation*, **4(1)**, 26.
<https://doi.org/10.1186/s43020-023-00116-3>
- Liu, X., Jiang, W., Chen, H., Zhao, W., Huo, L., Huang, L., Chen, Q., 2019. An analysis of inter-system biases in BDS/GPS precise point positioning. *GPS Solutions*, **23(4)**, 116.
<https://doi.org/10.1007/s10291-019-0906-3>
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., Schaer, S., 2017. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, **59(7)**, 1671–1697.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011>
- Nie, Z., Liu, F., Gao, Y., 2020. Real-time precise point positioning with a low-cost dual-frequency GNSS device. *GPS Solutions*, **24(1)**, 9.
<https://doi.org/10.1007/s10291-019-0922-3>
- Ogutcu, S., 2019. The contribution of Multi-GNSS Experiment (MGEX) to precise point positioning over Turkey: Consideration of observation time and satellite geometry. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, **6(3)**, 642–658.
<https://doi.org/10.31202/ecjse.563802>
- Ogutcu, S., Alcay, S., Duman, H., Ozdemir, B.N., Konukseven, C., 2023. Static and kinematic PPP-AR performance of low-cost GNSS receiver in monitoring displacements. *Advances in Space Research*, **72(11)**, 4795–4808.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.025>
- Oku Topal, G., Karabulut, M.F., Aykut, N.O., Akpınar, B., 2023. Performance of low-cost GNSS equipment in monitoring of horizontal displacements. *Survey Review*, **55(393)**, 536–545.
<https://doi.org/10.1080/00396265.2023.2179910>

Pan, L., Guo, F., 2018, Real-time tropospheric delay retrieval with GPS, GLONASS, Galileo and BDS data, *Scientific Reports*, **8(1)**, 17067.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-35155-3>

Paziewski, J., 2020. Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations. *Measurement Science and Technology*, **31(9)**, 091001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8a7d>

Paziewski, J., Sieradzki, R., Baryla, R., 2019. Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones. *GPS Solutions*, **23(4)**, 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s10291-019-0892-5>

Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M.E., Vázquez-Ontiveros, J.R., Hernández-Andrade, D., Cabanillas-Zavala, J.L., 2021. Sampling Rate Impact on Precise Point Positioning with a Low-Cost GNSS Receiver. *Applied Sciences*, **11(16)**, 7669.
<https://doi.org/10.3390/app11167669>

Shinghal, G., Bisnath, S., 2021. Conditioning and PPP processing of smartphone GNSS measurements in realistic environments. *Satellite Navigation*, **2(1)**, 10.
<https://doi.org/10.1186/s43020-021-00042-2>

Stępnia, K., Paziewski, J., 2022. On the quality of tropospheric estimates from low-cost GNSS receiver data processing. *Measurement*, **198**, 111350.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111350>

Wang, L., Li, Z., Wang, N., Wang, Z., 2021. Real-time GNSS precise point positioning for low-cost smart devices. *GPS Solutions*, **25(2)**, 69.
<https://doi.org/10.1007/s10291-021-01106-1>

Wielgocka, N., Hadas, T., Kaczmarek, A., Marut, G., 2021. Feasibility of Using Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receivers for Land Surveying. *Sensors*, **21(6)**, 1956.
<https://doi.org/10.3390/s21061956>

Xue, C., Psimoulis, P., Zhang, Q., Meng, X., 2021. Analysis of the performance of closely spaced low-cost multi-GNSS receivers. *Applied Geomatics*, **13(3)**, 415–435.
<https://doi.org/10.1007/s12518-021-00361-8>

Yi, D., Bisnath, S., Naciri, N., Vana, S., 2021. Effects of ionospheric constraints in Precise Point Positioning processing of geodetic, low-cost and smartphone GNSS measurements. *Measurement*, **183**, 109887.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109887>

Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **102(B3)**, 5005–5017.

<https://doi.org/10.1029/96JB03860>

İnternet kaynakları

- 1- <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>, (25.12.2023)