

Düşük Maliyetli ve Tek Frekanslı Çoklu GNSS Gözlemlerine Dayalı Varyometrik Yaklaşımın Düşey Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi (An Investigation of the Ability of the Variometric Approach Based on Low-Cost and Single-Frequency Multi-GNSS Observations to Detect Vertical Dynamic Movements)

Mert BEZCİOĞLU¹, Berkay BAHADUR², Emre BOZDOĞAN¹, Ahmet Anıl DİNDAR³,
Burak AKPINAR⁴, Metin NOHUTCU², Cemal Özer YİĞİT¹

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

²Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Çankaya, Ankara

³Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

⁴Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul

cyigit@gtu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 15.05.2024

Kabul Tarihi (Accepted): 15.07.2024

ÖZ

Bu çalışma düşük maliyetli GNSS (Global Navigation Satellite System) alıcı ve anteninden elde edilen SF (tek frekanslı) çoklu GNSS gözlemlerine dayalı VA (varyometrik yaklaşım) tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini değerlendirmektedir. Bu amaçla, düşey yönlü dinamik davranışları simüle edebilen bir sarsma tablası ile 0.3-3.0 Hz arasında frekans ve 5-30 mm aralığında değişen genliklere sahip düşey yönlü dinamik hareketler üretilmiştir. SF-VA tekniğinin kısa süreli ve düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği yüksek maliyetli VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) ve bağıl konum belirleme yöntemlerinden elde edilen yer değiştirme ve epoklar arası yer değiştirme sonuçları ile zaman ve frekans alanında karşılaştırılmalı bir yaklaşımla incelenmiştir. Düşük maliyetli GNSS gözlemlerinin VA tekniği ile değerlendirilmesi ise PPPH-VA isimli açık kaynak kodlu yazılım ile gerçekleştirilmiştir. GNSS tabanlı yöntemlerin değerlendirilmesinde çoklu GNSS gözlemleri kullanılmıştır. GNSS tabanlı yöntemlerin zaman ve frekans alanındaki doğrulaması ise GNSS bağımsız bir sensör olan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörü verileri referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı SF-VA tekniği kısa süreli dinamik davranışların baskın frekans değerini başarılı bir şekilde tespit ederken karşılık gelen genliklerde cm altı bir seviyede farklılıklar vardır. Ayrıca, elde edilen bulgular, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı SF-VA tekniğinin epoklar arası yer değiştirme alanında kısa süreli dinamik davranışları mm mertebesinde tespit ederken, yer değiştirme alanında ise cm mertebesinde tespit edebildiğini açıkça ifade etmektedir. Genel olarak, çalışmada elde edilen bulgular YSI (Yapı Sağlığı İzleme) sistemlerinde düşük maliyetli GNSS alıcılarının ve buradan elde edilen gözlemlere dayalı VA tekniğinin çeşitli geoteknik sensörleri destekleyici harici bir sensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Düşük maliyetli GNSS, U-blox, PPPH-VA, Varyometrik Yaklaşım, VADASE

ABSTRACT

This study evaluates the ability of the VA (variometric approach) technique to detect vertical dynamic behaviors based on SF (single-frequency) multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) observations obtained from a low-cost GNSS receiver and antenna. For this purpose, vertical dynamic motions with frequencies between 0.3 and 3.0 Hz and amplitudes varying between 5 and 30 mm were produced employing a shake table that can simulate vertical dynamic behaviors. The ability of the SF-VA technique to determine short-term and vertical dynamic behaviors was examined with a comparative approach in the time and frequency domain with the results obtained from both the high-cost VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) and Relative Positioning methods. The evaluation of low-cost GNSS observations with the VA technique was realized with the open-source PPPH-VA software. Multi-GNSS observations were employed to evaluate GNSS-based methods. Validation of GNSS-based methods was realized using data from the LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensor. While the SF-VA technique based on low-cost GNSS observations successfully detects the dominant frequency value of short-term dynamic behaviors, there are differences in the corresponding amplitudes at a sub-cm level. Moreover, the findings clearly indicate that the SF-VA technique, based on low-cost GNSS observations, can detect short-term dynamic behaviors in the time difference displacement at the mm-level, while it can detect behaviors at the order of cm in the displacement. Overall, the outcomes obtained in the study clearly show that the VA technique, based on the observations obtained therefrom, can be used as an external sensor supporting various geotechnical sensors in SHM (Structural Health Monitoring) systems.

Keywords: Low-cost GNSS, U-blox, PPPH-VA, Variometric Approach, VADASE

1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarih boyunca barınma ve ulaşım gibi temel ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşamlarını sürdürülebilmek için çeşitli yapılar inşa etmiştir. Modern toplumlar ise bu ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşamlarını kolaylaştırmak için uzun, orta ve kısa açıklıklı köprüler, viyadükler ve yüksek katlı binalar gibi farklı mega mühendislik yapıları geliştirmiş ve zamanla bu yapılara bağımlı hale gelmiştir (Farrar ve diğerleri, 2012). Ancak, mühendislik yapılarının deprem, rüzgâr yükü gibi doğal veya trafik yükü gibi insan kaynaklı dinamik yüklere devamlı olarak maruz kaldığının ve bu dinamik yüklerin de yapılarda kalıcı hasarlar meydana getirdiğinin altı çizilmelidir. Mega mühendislik yapıları olarak nitelendirilen yüksek binalar, tünel, boru hatları, rüzgâr tribünleri ya da uzun, orta ve kısa açıklıklı köprüler gibi kritik yapılar için hasar tespit ve karakterizasyon tekniklerinin uygulanması süreci YSİ (Yapı Sağlığı İzleme) olarak adlandırılır. Mühendislik yapılarında meydana gelen insan veya doğal afet kaynaklı hasarların düzenli olarak takip edilmesi ve yapıda meydana gelen herhangi bir kritik hasar durumunda ilgili yapının faaliyetinin sona erdirilerek olası bir can ve mal kaybının önüne geçilmesi için YSİ sistemlerinin kurulması son derece önemlidir (Xi ve diğerleri, 2020).

YSİ sistemlerinde yüksek örneklem aralığına sahip ivmeölçer, eğimölçer gibi çeşitli geoteknik sensörler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda GNSS (Global Navigation Satellite System) teknolojisinde meydana gelen gelişmeler sayesinde yapılarda oluşan dinamik yük kaynaklı yer değiştirmeleri belirlemek için 10, 20, 50 ve hatta 100 Hz örneklem aralığındaki jeodezik alıcıların YSİ sistemlerinde yer alan geoteknik sensörleri destekleyici sensörler olarak kullanılması yaygın hale gelmiş durumdadır (Gikas, 2012; Kaloop ve Li, 2014; Moschas ve Stiros, 2011). Mühendislik yapılarındaki dinamik yer değiştirmelerin izlenmesinde yüksek hassasiyete sahip ve en az iki GNSS alıcısı gerektiren bağıl konumlama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve diğerleri, 2021; Qu ve diğerleri, 2022). Fakat bağıl konum belirleme yönteminin sabit nokta gereksinimi, metropolitan alanlarda sinyal yansıma etkisinden arındırılmış ve uygun uydu görüşüne sahip sabit GNSS istasyonu tesisinin zorluğu göz önüne alındığında bu yöntemi dezavantajlı hale getirmektedir (Bahadur ve diğerleri, 2024a). Son yıllarda, herhangi bir referans GNSS istasyonuna ihtiyaç duymadan tek bir GNSS alıcısı kullanarak konum belirleyebilen PPP (Precise Point Positioning, PPP) yöntemi, YSİ sistemlerinde

bağıl konum belirleme tekniklerine göre oldukça güçlü bir alternatif haline gelmiştir (Yigit, 2016; Zumberge ve diğerleri, 1997). Mevcut çalışmalar, PPP tekniğinin kısa süreli ve yatay yönlü dinamik davranışları yüksek hassasiyetle belirleyebileceğini ortaya koymuş durumdadır (Ju ve diğerleri, 2022; Xu ve diğerleri, 2013). Yigit ve Gurlek (2017) ise yüksek örneklem aralıklı PPP tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini esnek çubuk modellerini kullanarak araştırmış ve PPP tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları başarılı bir şekilde tespit edebildiğini ve yatay yönde gerçekleştirilen çalışmalara benzer bir şekilde PPP yönteminin bağıl konum belirleme tekniğine güçlü bir alternatif olduğunu ileri sürmüştür. Benzer şekilde, Kaloop ve diğerleri, (2020) PPP yönteminin düşey yönlü dinamik hareketleri tespit edebilme kabiliyetini esnek çubuk modelleri kullanarak incelemiştir. Çalışma, ilgili çubukların sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen frekans değerlerinin PPP tekniğinden elde edilenler ile güçlü bir uyum içinde olduğunu öne sürmüştür ve PPP yönteminin düşey yönlü dinamik davranışların baskı frekans değerini başarılı bir şekilde tespit edebildiğini göstermiştir.

PPP yönteminin tek bir GNSS alıcısından elde edilen gözlemleri kullanarak yatay ve düşey yönlü kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğine rağmen hassas yörünge ve saat ürünleri gibi ek parametrelere ihtiyaç duyması ve gerçek zamanlı uygulamalarda bu ürünlerin temini için kesintisiz internet gerekliliği yeni bir teknik ihtiyacını doğurmuştur. Bu doğrultuda, ham GNSS gözlemlerinden anlık olarak elde edilen yayın efemerisi bilgilerini kullanarak tek bir GNSS alıcısı ile ardışık epoklar arasındaki yer değiştirme farklarının elde edilmesine olanak sağlayan ve herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeyen VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımı ortaya atılmıştır (Colosimo ve diğerleri, 2011). Mevcut literatürde VADASE yaklaşımının deprem kaynaklı oluşan ko-sismik yer değiştirmeleri yakalayabilme kabiliyeti ve yöntemine çoklu GNSS gözlemlerinin katkısı irdelenmiştir (Fortunato ve diğerleri, 2019; Geng ve diğerleri, 2016; Tesolin ve diğerleri, 2019). Bezcioğlu ve diğerleri, (2022b) ise VADASE yaklaşımının kısa süreli ve yatay yönlü dinamik hareketleri belirleyebilme kabiliyetini ve çoklu GNSS gözlemlerinin yöntemine olan katkısını yatay yönlü sarsma tablasını kullanarak gerçek zamanlı olarak incelemiş ve yöntemin PPP ve özellikle bağıl konum belirleme teknikleri ile oldukça güçlü bir uyum sergilediğini belirtmiştir. Öte yandan, Karadeniz ve diğerleri, (2022) VADASE tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini çelik yassı

çubuk kullanarak araştırmış ve VADASE tekniğini düşey yönlü dinamik davranışların baskın frekans ve karşılık gelen genlik değerlerini başarılı bir şekilde tespit edebildiğini ve genel olarak düşey yönlü dinamik davranışları cm-altı mertebede belirleyebildiğini ifade etmiştir.

Bağıl konum belirleme, PPP veya VADASE tekniklerini kullanarak hassas yer değiştirme bilgisi elde etmek ve GNSS gözlemlerindeki en önemli hata kaynaklarından biri olan iyonosfer etkisini ortadan kaldırmak için genellikle çift veya çok frekanslı GNSS gözlemleri toplayabilen yüksek maliyetli GNSS alıcıları kullanılmaktadır. Ancak, bu jeodezik alıcıların yüksek maliyeti, geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesinin önündeki en büyük engeldir. Her ne kadar tek frekanslı GNSS alıcıları bugüne kadar pazara hâkim olsa da tek frekanslı GNSS gözlemlerinin faz sıçraması, iyonosferik etki gibi GNSS hata kaynaklarından etkilenme ihtimali daha yüksektir. Ancak son yıllarda GNSS teknolojilerindeki gelişmeler düşük maliyetli GNSS alıcı ve antenleri ortaya çıkmış ve böylece düşük maliyetli GNSS alıcıları ile çok frekanslı ve çoklu GNSS gözlemlerini kullanarak 20 Hz'e kadar GNSS gözlemlerinin toplanmasına olanak sağlanmıştır Düşük maliyetli alıcı ve antenlerin yüksek maliyetli alıcı ve antenlere kıyasla diğer avantajları ise daha küçük, hafif ve kompakt olmasıdır (Bahadur ve diğerleri, 2024b). Bu durum söz konusu alıcı ve antenleri zorlu ölçüm koşullarında kullanılması için ideal hale getirmektedir. Düşük maliyetli GNSS teknolojisindeki gelişmelerin sonucunda düşük maliyetli alıcılar ve antenlerin çeşitli GNSS uygulamalarında kullanılabilirliği araştırılmaya başlanmıştır (Bezciöğlü, 2023; Oku Topal ve diğerleri, 2023). Son zamanlarda ise düşük maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilen gözlemler gerçek zamanlı olarak VA (Varyometrik Yaklaşım) tekniği ile değerlendirilmiştir. Bahadur ve diğerleri, (2024b) gerçekleştirdikleri bir çalışmada düşük maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilen gözlemlere dayalı VA tekniğinin kısa süreli ve yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini ve yönteme çoklu GNSS gözlemlerinin katkısını araştırmış ve düşük maliyetli GNSS alıcılarına dayalı VA tekniğinin YSİ ve deprem erken uyarı sistemlerinde destekleyici bir sensör ve algoritma olarak kullanılması için büyük bir potansiyel taşıdığını ifade etmiştir.

Mevcut literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında VA tekniğinin deprem erken uyarı sistemleri için ko-sismik davranışları ve YSİ sistemleri için yatay yönlü ve kısa süreli harmonik

davranışları belirleyebilme yeteneğinin değerlendirildiği görülmektedir. Ayrıca, sadece bir çalışmada da çift frekanslı GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğinin değerlendirildiği de görülmektedir. Ancak, bu çalışmada esnek çubuk modelinden yararlanılarak kısıtlı bir frekans ve genlik aralığı incelenmiş, GNSS dışı harici bir referans sensör verisi kullanılmamış ve çift frekanslı jeodezik alıcıdan elde edilen gözlemler değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği de henüz değerlendirilmemiştir. Son olarak, güncel çalışmalarda düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniği sadece geleneksel PPP ve bağıl konum belirleme yöntemleri ile karşılaştırılmış ve yüksek maliyetli jeodezik GNSS alıcısından elde edilen gözlemlere dayalı VADASE tekniği ile karşılaştırmalı bir analiz henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada, mevcut benzer çalışmalardan farklı olarak ilk defa düşük maliyetli ve SF (tek frekanslı) GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği düşey yönde ve tek ekseninde hareket edebilme yeteneğine sahip bir sarsma tablası kullanılarak incelenmiş ve yöntemin gerçek zamanlı olarak düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği bağıl konum belirleme ve yüksek maliyetli jeodezik GNSS alıcısından elde edilen gözlemlere dayalı VADASE tekniği ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, söz konusu sarsma tablası ile 0.3 ile 3.0 Hz arasında frekans ve 5 ile 30 mm arasında değişen genlik değerlerine sahip 20 adet düşey yönlü harmonik salınımlar üretilmiş ve düşük maliyetli GNSS alıcısı ve anteninden elde edilen tek frekanslı gözlemlere dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik hareketleri belirleyebilme yeteneği bağıl konum belirleme ve yüksek maliyetli VADASE sonuçları ile zaman ve frekans alanlarında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmayı mevcut benzerlerinden ayıran bir diğer özellik ise GNSS tabanlı yöntemlerin doğrulanması için GNSS bağımsız bir sensör olan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) kullanılmasıdır.

2. YÖNTEM

a. Tek Frekanslı Varyometrik Yaklaşım Modeli

SF-VA tekniği, GNSS alıcısından elde edilen taşıyıcı dalga faz gözlemine (L) dayanmaktadır ve i frekansından uzunluk biriminde elde edilen

taşıyıcı faz gözlemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$L_{i,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c(dt_r^s - dT^{s,j}) + T_r^{s,j} - I_{i,r}^{s,j} + \lambda_i^s N_{i,r}^{s,j} + p_{i,r}^{s,j} + \varepsilon(L_{i,r}^{s,j}) \quad (1)$$

Denklem 1'de r ve s sırasıyla alıcı ve uydu sistemini ifade ederken, j uydu numarasını göstermektedir. Ayrıca, $\rho_r^{s,j}$ alıcı ve uydu arasındaki geometrik uzunluğu, dt_r^s alıcı saat hatasını, $dT^{s,j}$ uydu saat hatasını, c ışık hızını, $T_r^{s,j}$ troposferik gecikmeyi, $I_{i,r}^{s,j}$ i frekansı üzerindeki iyonosferik gecikmeyi, λ_i^s ilgili sinyalin dalga boyunu, $N_{i,r}^{s,j}$ tam sayı belirsizlik parametresini ve ε ise gözlemlerdeki gürültü ve çok yollu yansıma etkisini göstermektedir. Bunlara ek $p_{i,r}^{s,j}$ donanımsal hatalar, rölativistik etkiler, faz merkezi kayıklıkları ve faz dönmesi gibi hata kaynaklarının toplamını ifade etmektedir.

Denklem 1'de ifade edilen tek frekanslı faz gözleminin ardışık iki epok arasındaki tekli farkı alınarak tek frekanslı VA denklemi elde edilmektedir;

$$\Delta L_{i,r}^{s,j} = \Delta \rho_r^{s,j} + c(\Delta dt_r^s - \Delta dT^{s,j}) + \Delta T_r^{s,j} - \Delta I_{i,r}^{s,j} + \Delta \lambda_i^s N_{i,r}^{s,j} + \Delta p_{i,r}^{s,j} + \varepsilon(\Delta L_{i,r}^{s,j}) \quad (2)$$

Denklem 2'de Δ ifadesi tekli fark operatörünü belirtmektedir. İlaveten $\Delta \rho_r^{s,j}$ iki ardışık epok arasındaki geometrik mesafenin değişimini gösterir. Bu terim Dünya dönüşü ve uydu yörünge hareketi kaynaklı yer değiştirmelerinin ($[\Delta \rho_r^{s,j}]_{OR}$) yanı sıra okyanus yüklemesi ve katı Yer gelgiti kaynaklı yer değiştirmeleri ($[\Delta \rho_r^{s,j}]_{EtOl}$) de içermektedir. Ardışık epoklar arasındaki alıcı, üç boyutlu (3B) bir yer değiştirme yaptığında ilgili terim okyanus yüklemesi ve katı yer gelgiti kaynaklı yer değiştirmelere ilaveten görüş hattı vektörü boyunca ifade edilen 3B yer değiştirmeleri de içerecektir ($e_r \Delta \xi_r$). Burada e_r ilgili epokta alıcı ile uydu arasındaki birim vektörünü, $\Delta \xi_r$ ise Yer merkezli Yer sabit koordinat sistemindeki 3B yer değiştirmeleri ifade etmektedir. Faz gözlemleri, döngü kaymasından bağımsız düşünüldüğünde ardışık epoklar arasında faz belirsizlik parametresi sabit olarak düşünülebilir. Bu durum sonucunda ardışık epoklar arasında fark alınması faz belirsizlik parametresinin etkisinin göz ardı edilmesini sağlamaktadır. Kısa periyotlardaki düşük iyonosferik aktivite göz önünde bulundurulup fark alındığında faz gözlemi içerisindeki iyonosferik etki de benzer şekilde göz ardı edilebilmektedir. Bu bilgiler dikkate

alındığında Denklem 2 aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\Delta L_{i,r}^{s,j} = (e_r \Delta \xi_r + c \Delta dt_r^s) + ([\Delta \rho_r^{s,j}]_{OR} - c \Delta dT^{s,j} + \Delta T_r^{s,j}) + ([\Delta \rho_r^{s,j}]_{EtOl} + \Delta p_{i,r}^{s,j}) + \varepsilon(\Delta L_{i,r}^{s,j}) \quad (3)$$

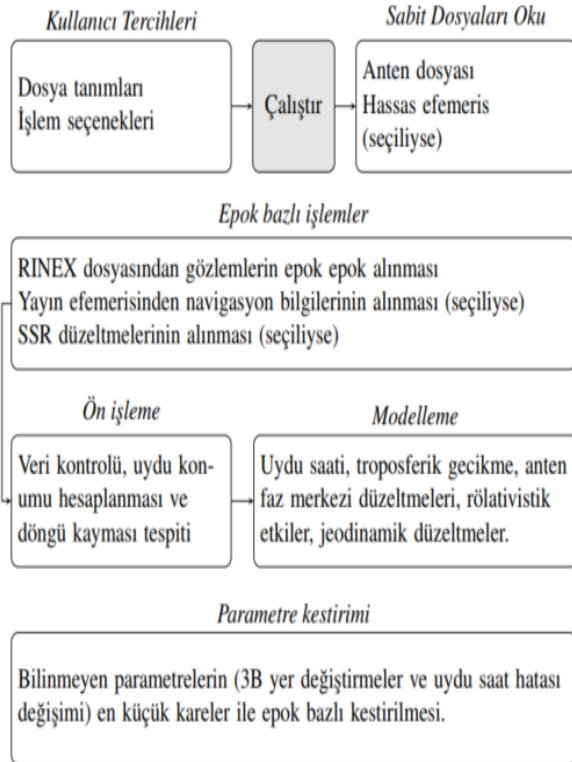
Yukarıdaki denklem tek frekanslı varyometrik yaklaşım yönteminin gözlem modelini temsil etmekte ve üç boyutlu yer değiştirme bileşenleri ile alıcı saat hatasındaki değişimi içeren toplam dört bilinmeyen parametreyi kapsar. $[\Delta \rho_r^{s,j}]_{OR} - c \Delta dT^{s,j} + \Delta T_r^{s,j}$ bölümü, saat ve uydu yörünge bilgilerinin yanı sıra troposferik gecikme modeli vasıtasıyla elde edilebileceği için bilinmeyen parametrelere dahil edilmez. Ayrıca $[\Delta \rho_r^{s,j}]_{EtOl} + \Delta p_{i,r}^{s,j}$ kısmı da standart model ve düzeltmeler kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 3'te tahmin edilen parametreler en küçük kareler yöntemiyle elde edilmektedir. En küçük kareler yöntemini uygulamak ve dört bilinmeyen parametreyi tahmin edebilmek için en az dört uydudan gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

b. PPPH-VA

Düşük maliyetli GNSS alıcısından alınan gözlemleri gerçek zamanlı olarak değerlendirmek için MATLAB tabanlı açık kaynak kodlu PPPH-VA yazılım paketi kullanılmıştır. Bahadır ve diğerleri, (2024a) tarafından geliştirilen PPPH-VA yazılımı çift frekanslı gözlemlerin yanı sıra tek frekanslı çoklu GNSS gözlemlerini hem gerçek zamanlı hem de sonradan değerlendirme modunda çözebilmektedir. PPPH-VA yazılım paketi Veri Aktarma, Ön İşleme ve Modelleme, Atmosfer ve Analiz olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. İlk üç bölüm gerçek zamanlı varyometrik yaklaşım çözümlerini gerçekleştirmek için gereken modelleri ve ilişkili parametreleri içerirken, son bölüm çözümler sonrası elde edilen sonuçları değerlendirmek ve görselleştirmek içindir.

PPPH-VA yazılım paketinde ilk bölüm olan Veri Aktarma kısmında, yazılım gerekli navigasyon dosyalarını belirlemektedir. Varyometrik yaklaşım için yörünge ve saat kaynağı olarak yayın efemerisine ilaveten, IGS (International GNSS Service) gerçek zamanlı ürünleri ve ultra hızlı ürünler de kaynak seçenekleri arasında yer almaktadır. Yazılım paketinde ikinci bölüm olan Ön İşleme ve Modelleme bölümü, navigasyon dosyalarından elde edilen ham verilerin aykırı değer, faz sıçraması ve saat tutarsızlıkları gibi tespitlerin yanı sıra hata kaynaklarının GNSS gözlemleri üzerindeki etkilerinin azaltılmasından sorumludur. Atmosfer sekmesinde troposferik

gecikmenin düzeltilmesi için Saastamoinen (1972) modelinin yanı sıra VMF1 (Vienna Mapping Function 1) ve VMF3 (Vienna Mapping Function 3)'ün ızgara (grid) ürünleri de kullanılabilir (Boehm ve diğerleri, 2004; Landskron ve Böhm, 2018). Bu troposfer modellerinin uygulanmasında gerekli olan atmosferik parametreler için GPT2 (Global Pressure and Temperature 2) ve GPT3 (Global Pressure and Temperature 3) modelleri kullanılabilir (Lagler ve diğerleri, 2013; Landskron ve Böhm, 2018). Ayrıca, troposferik ızdüşüm fonksiyonu için VMF1, VMF3 ve GMF (Global Mapping Function) olmak üzere üç farklı seçenek bulunmaktadır. Burada, varyometrik süreçler için kullanılan çok kısa periyotlarda (1 Hz veya daha yüksek) iyonosferik değişim oldukça kısıtlı olduğundan söz etmek gerekmektedir. Bu yüzden tek frekanslı varyometrik yaklaşım için iyonosfer düzeltmesine ihtiyaç yoktur. Analiz sekmesinde ise varyometrik işlem sona erdikten sonra değerlendirme ve görselleştirme amacıyla çeşitli analizler yapılabilmektedir. Şekil 1 varyometrik çözüm için uygulanan genel akış şemasını, Tablo 1 ise PPPH-VA yazılımında varyometrik işlem aşamasında uygulanan düzeltme modellerini göstermektedir.



Şekil 1. PPPH-VA yazılımında varyometrik çözüm için genel akış şeması.

Tablo 1. PPPH-VA yazılımında varyometrik çözüm için uygulanan düzeltme yaklaşımları.

Hata kaynağı	Düzeltilme yaklaşımı	
Uydu yörünge ve saat bilgisi	Yayın efemerisi ya da IGS-RTS düzeltmeleri	Ultra hızlı ürünler
Uydu anten faz merkezi	-	IGS mutlak anten modeli
Faz dönmesi	Düzeltilme uygulanır (Wu ve diğerleri, 1993)	
Troposfer	Kullanıcı tercihine göre düzeltilir, standart olarak GPT3/VMF3 (Landskron ve Böhm, 2018) ile Saastamoinen (1972) modeli	
Alıcı anten faz merkezi	IGS mutlak anten modeli	
Rölativistik etkiler	Düzeltilme uygulanır (Kouba, 2015)	
Katı Yer gelgiti ve atmosfer yüklemesi	Düzeltilme uygulanır (Petit ve Luzum, 2010)	

3. DENEY TASARIMI

Çalışmanın bu bölümü düşey yönlü dinamik hareketleri izlemek için GNSS gözlemlerinin gerçek zamanlı olarak elde edilmesini ve gerçekleştirilen harmonik salınım deneylerinin tasarımını içermektedir. Çalışma kapsamında tasarlanan harmonik salınım deneyleri, 11 Temmuz 2023 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümünün çatısında gerçekleştirilmiştir. Harmonik salınım deneylerinde, toplam yer değiştirmesi 70 mm ve maksimum hızı 400 mm/sn olan düşey yönlü sarsma tablası kullanılmıştır. Tablanın yer değiştirme hareketi bilgileri, hareketli platform altında gömülü şekilde bulunan 100 Hz frekansa ve mm altı hassasiyete sahip LVDT sensörü ile elde edilmiştir. Sarsma tablası üzerine 3 adet GNSS anteni monte edilmiştir. Bu antenlerden ilki yüksek maliyetli gerçek zamanlı VADASE çözümleri için kullanılmak üzere Leica GR30 alıcısı için gözlem toplayan Leica AS 11 antenidir. İkinci anten, bağıl konum belirleme çözümleri için anten ile bütünleşik durumda olan CHC I80 jeodezik GNSS alıcısıdır. Son anten ise, düşük maliyetli varyometrik yaklaşım çözümlerinde kullanılan düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı için gözlem toplayan u-blox ANN-MB-00-00 antenidir. Bu üç alıcı ve antenlere ilaveten, yine bir CHC I80 jeodezik GNSS alıcısı bağıl konum belirleme çözümleri için sarsma tablasından

yaklaşık 20 m mesafedeki daha önceden konumu belirlenmiş bir noktaya kurulmuştur. Şekil 2, çalışma için kullanılan sarsma tablasını ve GNSS antenlerini göstermektedir.

Tek frekanslı düşük maliyetli varyometrik yaklaşımın düşey yönlü dinamik hareketleri gerçek zamanlı olarak yakalayabilme yeteneğinin değerlendirilmesi amacıyla, yapıların olası genlik ve frekans değerlerini temsil eden 20 adet harmonik salınım deneyi tasarlanmıştır. Üretilen harmonik salınımların frekansları 0.3 ile 3 Hz arasında, frekanslara karşılık gelen genlik değerleri ise 5 ile 30 mm arasında değişmektedir. Tablo 2, üretilen harmonik salınımların genlik ve frekans bilgilerini göstermektedir. Çalışmada kullanılan sarsma tablası 0 ile 5 Hz frekans değerleri aralığında ve maksimum 35 mm'ye kadar genlik değerinde harmonik salınımlar üretilebilmektedir. Sarsma tablası ile 5 Hz frekans ve 35 mm genlik değerine sahip salınım da üretilebilir fakat yüksek frekans ve yüksek genlik

durumunda sarsma tablasının mekanik olarak zarar görme ihtimali bulunmaktadır. Bu yüzden, çalışmada düşük frekanslarda yüksek genlik değerlerine sahip salınımlar üretilmişken yüksek frekanslarda düşük genlikli salınımlar üretilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve GNSS antenleri.

Tablo 2. Harmonik salınım deneylerinin genlik ve frekans bilgileri.

Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frekans (Hz)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0
Genlik (mm)	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	15	5	10	15	5	10

4. HARMONİK SALINIM DENEYİ SONUÇLARI

a. Yer Değiştirme Farkı Sonuçları

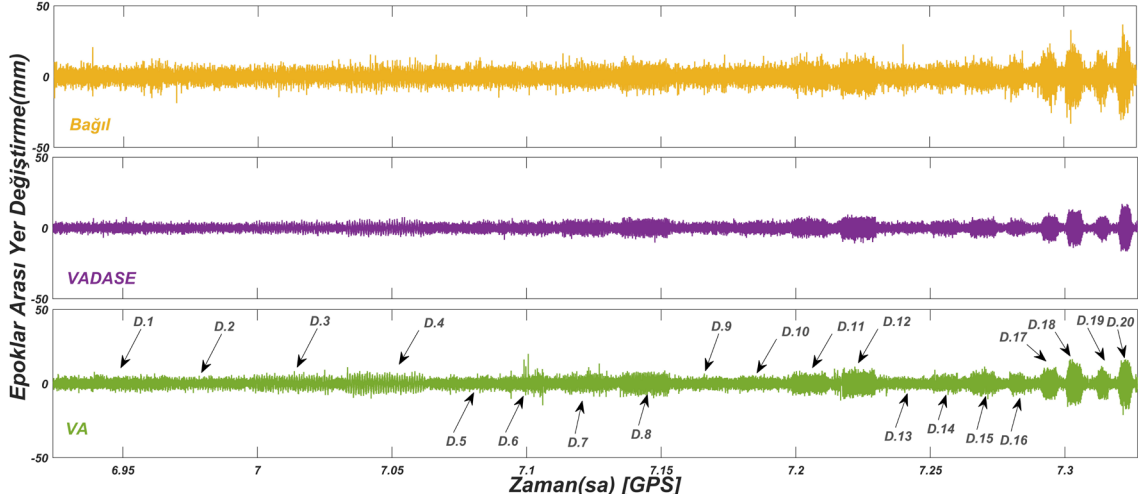
Yüksek maliyetli Leica GR30 alıcı ve AS11 anteninden elde edilen gözlemlere dayalı VADASE ve düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcı ve ANN-MB-00 antenine dayalı Varyometrik Yaklaşım yöntemlerinden türetilen epoklar arası yer değiştirme sonuçları çalışmanın bu bölümünde tartışılacaktır. VADASE ve VA algoritmaları yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği üzere ardışık epoklar arası farkları olarak gerçek zamanlı dinamik deformasyonları tespit imkânı sağlamaktadır. Ardışık epoklar arası farklar GNSS gözlemlerinde meydana gelen iyonosfer, troposfer, uydu ve alıcı saati, sinyal yansıma, anten faz merkezi hatası ve değişimi gibi bazı sistematik hataları elimine etmektedir, ancak bu hataların artık kısımları uzun dönemde dalgalanmalara sebep olmaktadır (Bezciöglü ve diğerleri, 2022b). Bu uzun süreli dalgalanmalar her ne kadar kısa süreli harmonik hareketlerin frekansını tespit etme uygulamalarında bir problem olmasa da zaman alanında yer değiştirme zaman serilerini incelerken bir yapının sinyali olmayan uzun periyotlu dalgalanmaların varlığına sebep olmaktadır. Bu etkilerin giderilmesi için yüksek geçirgenli filtreleme

genellikle uygulanan bir yöntemdir (Yigit ve diğerleri, 2021). Buna ek olarak, gerçek zamanlı uygulamalarda filtreleme işlemi yerine VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen epoklar arası yer değiştirme bilgileri de kısa süreli dinamik davranışları elde etmek için kullanılabilir (Bezciöglü ve diğerleri, 2022a). Bu nedenle, çalışma kapsamında incelenen GNSS tabanlı tekniklerin performansını daha detaylı incelemek için filtreleme gerektirmeyen epoklar arası yer değiştirme farkı değerleri de analiz edilmiştir. Burada epoklar arası yer değiştirme değerlerinin VADASE veya VA tekniğinin GNSS kullanıcılarına sağladığı ham değerler olduğu ve ilgili yöntemler ile doğrudan gerçek zamanlı olarak elde edildiğinin altı bir kez daha çizilmelidir. İlgili değerler yukarıda da bahsedildiği gibi uzun süreli dalgalanmaların etkisini içermediği için GNSS kullanıcılarına gerçek zamanlı uygulamalarda herhangi bir filtreleme kullanmadan hem frekans hem de zaman alanında incelemeler ve değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Şekil 3 deneyler sırasında bağlı, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen epoklar arası yer değiştirme zaman serilerini görselleştirmektedir. Görüldüğü üzere epoklar arası yer değiştirme zaman serileri uzun periyotlu dalgalanma etkisi içermemekte ve sadece sıfır eksenini etrafında

salınımlar gösteren bir yapıya sahiptir. Kısacası, yer değiştirme farkı zaman serileri sadece dinamik hareketleri ve GNSS öz gürültüsünü içermektedir. Şekil 3 incelendiğinde VADASE ve VA sonuçlarının birbirine yakın olduğu fakat bağıl sonuçların daha gürültülü olduğu görülebilir.

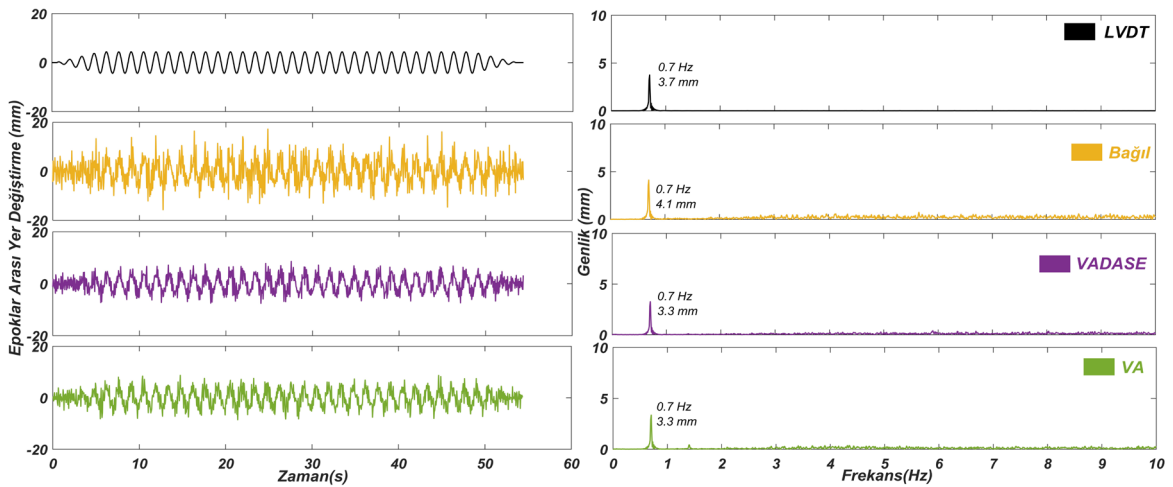
Bunun sebebi VADASE ve VA yöntemlerinde tek GNSS alıcısı/anteni kullanılırken, bağıl yöntemde 2 GNSS alıcısı ve anteni kullanılmasıdır. Bu nedenle bağıl yöntemin gürültüsü diğer iki yöntemden daha fazladır (Bezciöglü ve diğerleri, 2022b).



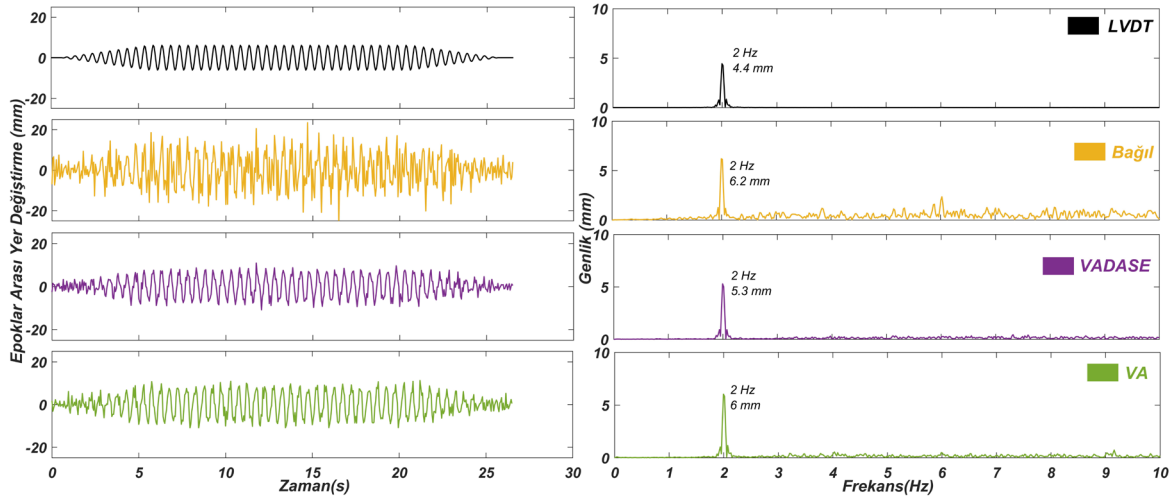
Şekil 3. Yer değiştirme farkı zaman serisi.

Yöntemlerin zaman ve frekans alanında görsel olarak karşılaştırması için deney 11 ve 17 temsili durumlar olarak seçilmiş ve ilgili deneylerde GNSS tabanlı teknikler ve referans LVDT sensöründen elde edilen zaman serileri ve karşılık gelen FFT (Fast Fourier Transform) spektrumları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te ifade edilmiştir. Her iki şekilden düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı olarak elde edilen VA epoklar arası yer değiştirme zaman serilerinin referans LVDT sensörü ve bağıl zaman serileri ile güçlü bir uyum sergilediği görülebilir. Ayrıca, VA zaman serileri yüksek maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı olarak

elde edilen VADASE zaman serileri ile de son derece tutarlıdır. Frekans alanında ise tüm GNSS tabanlı yöntemlerin söz konusu iki deneyde de baskın frekans değerlerini başarılı bir şekilde tespit edebildiği açıkça görülmektedir. Ancak, baskın frekans değerine karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklılıklar olduğu belirtilmelidir. Ancak bu farklılıkların VA tekniği için 1.6 mm değerinden yüksek olmadığı göz önüne alındığında düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin kısa süreli harmonik salınımları tespit edebilme başarısı açıktır.



Şekil 4. Deney 11 için yer değiştirme farkı zaman serisi ve FFT sonuçları.



Şekil 5. Deney 17 için yer değiştirme farkı zaman serisi ve FFT sonuçları.

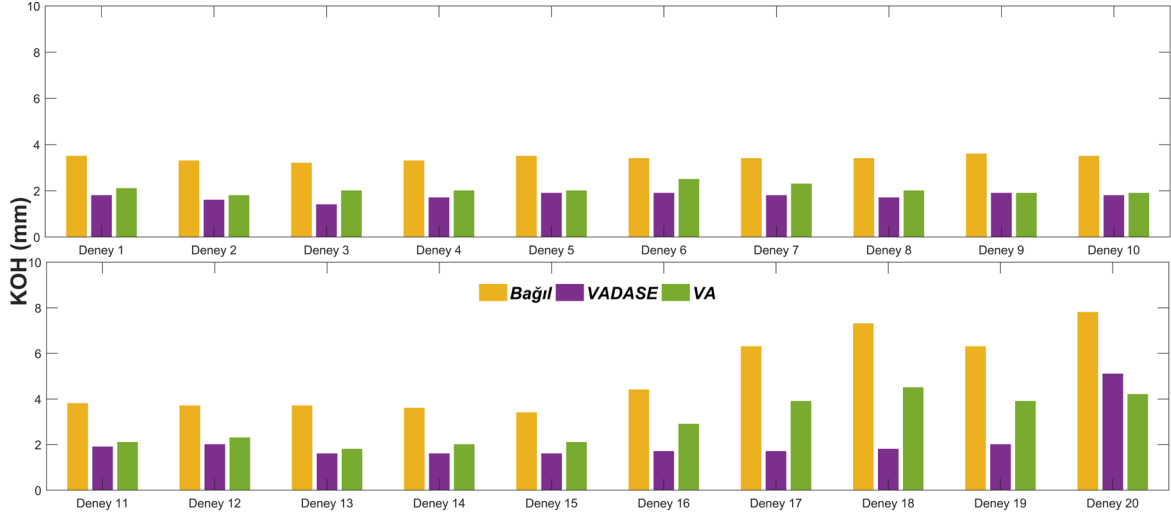
GNSS tabanlı yöntemlerin kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğini daha detaylı incelemek ve frekans alanına ek olarak zaman alanında da karşılaştırılabilmesi için, referans LVDT sensöründen elde edilen epoklar arası yer değiştirme değerleri ile GNSS tabanlı tekniklerden elde edilen değerler arasındaki farkların maksimum değeri ve KOH (Karesel Ortalama Hataları) hesaplanmıştır (Tablo 3). Ayrıca, ilgili yöntemlerin zaman alanındaki performansını daha detaylı vurgulamak için KOH değerlerinin bar grafiği olarak Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Tablo 3 ve Şekil 6'dan da görüldüğü üzere VADASE ve VA yöntemleri bağlı tekniğinden beklenildiği üzere daha düşük KOH değerlerine sahiptir. Bağlı konum belirleme tekniğinden elde edilen KOH değerleri 3.2 ile 7.8 mm arasında değişirken VADASE yönteminde 1.4 mm ile 5.1 mm arasında, VA yönteminde 1.8 mm ile 4.5 mm arasında değişmektedir. VADASE ve VA değerleri karşılaştırıldığında VADASE yöntemiyle elde edilen KOH değerleri VA yöntemine göre aralarında çok büyük fark olmamakla birlikte kısmen daha düşüktür. Bu farkın sebebi VADASE sonuçları yüksek maliyetli jeodezik alıcı ve anteninden elde edilirken, VA sonuçlarının düşük maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilmesidir.

Epoklar arası yer değiştirme alanında çalışma kapsamında değerlendirilen tüm GNSS tabanlı yöntemlerden FFT analizi ile elde edilen baskın frekans ve karşılık gelen genlik değerleri Tablo 4'te verilmiştir. GNSS yöntemlerinin frekans alanındaki performansı incelendiğinde tüm GNSS yöntemlerinin harmonik hareketlerin frekansını başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Baskın frekans değerine karşılık gelen genlikleri

incelendiğinde ve LVDT ile karşılaştırıldığında GNSS yöntemlerinin düşük frekanslarda benzer fakat frekans yükseldikçe VADASE ve VA yöntemlerinin bağlı yöntemle göre kısmen LVDT sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Tüm deneyler göz önüne alındığında VADASE tekniği karşılık gelen genlik değerlerini 0.1 ile 3.7 mm arasında farkla tespit ederken, VA tekniği 0.0 ile 3.4 mm arasında tespit etmiştir. VADASE ve VA tekniklerinin elde ettiği genlik farklılıkları her iki teknik için de 0.6 mm'dir. Bu sonuçlar, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin frekans alanındaki başarısını açıkça göstermektedir.

Tablo 3. Yer değiştirme farkı alanı için deneylerin numaraları (DN), KOH (mm) ve maksimum (mm) değerleri.

DN	BAĞIL		VADASE		VA	
	Maks.	KOH	Maks.	KOH	Maks.	KOH
1	20.4	3.5	7.4	1.8	7.5	2.1
2	18.1	3.3	5.4	1.6	6.0	1.8
3	12.8	3.2	5.8	1.4	8.4	2.0
4	13.6	3.3	6.0	1.7	9.0	2.0
5	14.2	3.5	5.9	1.9	7.3	2.0
6	14.9	3.4	9.1	1.9	20.3	2.5
7	16.1	3.4	7.1	1.8	10.5	2.3
8	13.9	3.4	6.0	1.7	8.6	2.0
9	14.9	3.6	6.3	1.9	6.7	1.9
10	13.9	3.5	5.8	1.8	5.8	1.9
11	13.3	3.8	6.8	1.9	8.0	2.1
12	12.1	3.7	7.2	2.0	8.7	2.3
13	21.3	3.7	5.4	1.6	5.3	1.8
14	11.4	3.6	4.7	1.6	8.2	2.0
15	12.9	3.4	5.4	1.6	9.5	2.1
16	18.0	4.4	5.3	1.7	8.7	2.9
17	22.4	6.3	6.5	1.7	10.6	3.9
18	26.0	7.3	5.1	1.8	11.6	4.5
19	21.5	6.3	5.7	2.0	10.6	3.9
20	28.4	7.8	11.4	5.1	12.1	4.2



Şekil 6. Epoklar arası yer değiştirme alanı için deneylerden elde edilen KOH değerleri.

Genel olarak, epoklar arası yer değiştirme alanında elde edilen bulgular düşük maliyetli GNSS alıcı ve antenlerinin gerçek zamanlı dinamik deformasyonların tespiti uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabilirliğini açıkça

göstermekte ve düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin YSİ sistemlerine başarılı bir şekilde entegre edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Yer değiştirme farkı alanı için deneylerin frekans (Hz) ve genlik (mm) değerleri.

Deney No	LVDT		BAĞIL		VADASE		VA	
	Frekans	Genlik	Frekans	Genlik	Frekans	Genlik	Frekans	Genlik
1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2
2	0.3	0.8	0.3	0.9	0.3	0.6	0.3	0.8
3	0.3	1.6	0.3	1.7	0.3	1.5	0.3	1.9
4	0.3	2.4	0.3	2.3	0.3	2.1	0.3	3.2
5	0.5	0.7	0.5	0.7	0.5	0.6	0.5	0.9
6	0.5	1.4	0.5	1.3	0.5	1.2	0.5	1.4
7	0.5	2.8	0.5	2.8	0.5	2.5	0.5	2.3
8	0.5	4.1	0.5	4.6	0.5	4.0	0.5	4.0
9	0.7	0.9	0.7	1.0	0.7	0.8	0.7	0.7
10	0.7	1.9	0.7	2.1	0.7	1.6	0.7	1.5
11	0.7	3.7	0.7	4.1	0.7	3.3	0.7	3.3
12	0.7	5.6	0.7	6.2	0.7	5.1	0.7	4.7
13	1.0	1.3	1.0	1.5	1.0	1.1	1.0	0.9
14	1.0	2.6	1.0	3.0	1.0	2.3	1.0	2.3
15	1.0	3.8	1.0	4.6	1.0	3.4	1.0	3.6
16	2.0	2.2	2.0	4.1	2.0	2.5	2.0	3.0
17	2.0	4.4	2.0	6.2	2.0	5.3	2.0	6.0
18	2.0	6.7	2.0	8.2	2.0	7.8	2.0	8.7
19	3.0	3.1	3.0	5.7	3.0	4.7	3.0	5.2
20	3.0	6.2	3.0	11.3	3.0	9.9	3.0	9.6

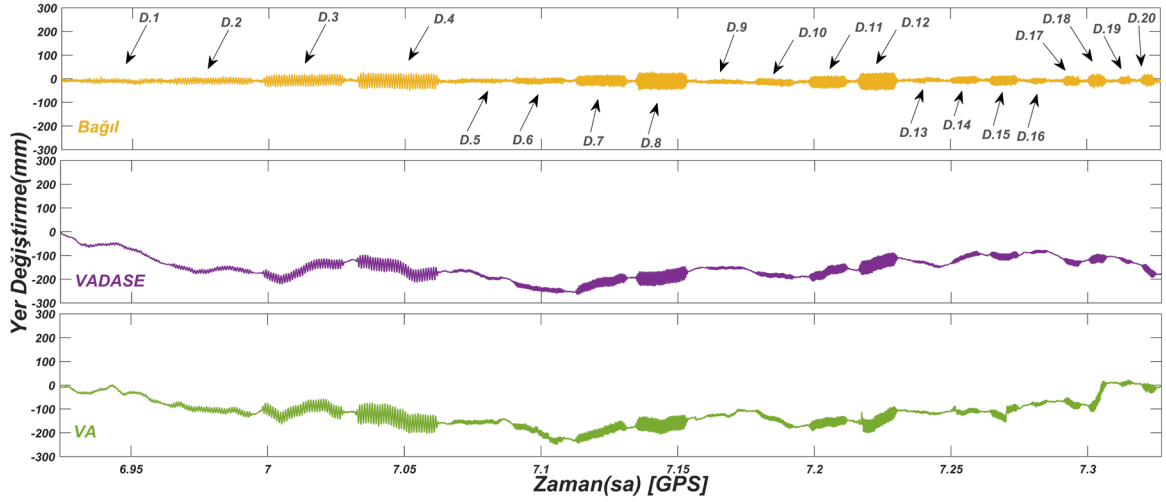
b. Yer değiştirme Sonuçları

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin dikey yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği bu bölümde tartışılmaktadır. Burada, bir önceki alt başlığa benzer bir şekilde VA tekniğinin yeteneğinin, yüksek maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VADASE ve bağıl konum

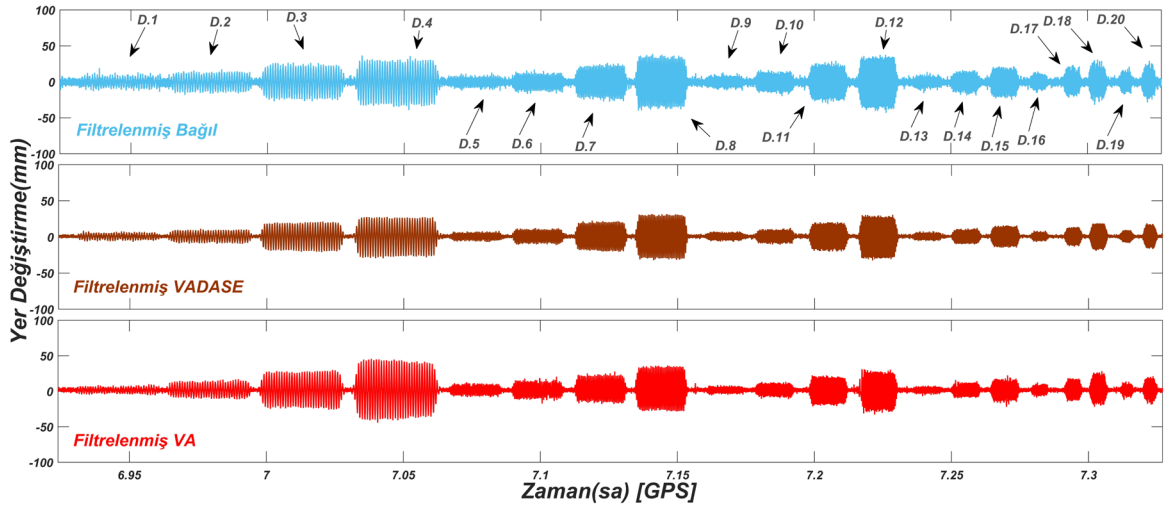
belirleme teknikleri ile karşılaştırmalı bir yaklaşım ile değerlendirildiğini ifade etmektedir. Ayrıca referans LVDT sensörünün örneklem aralığı 100 Hz olduğu için adil bir karşılaştırma gerçekleştirmek amacıyla ilgili sensör verileri 20 Hz örneklem aralığına yeniden örneklenmiştir. Şekil 7, çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde GNSS tabanlı yaklaşımlardan elde

edilen yer değiştirme zaman serilerini göstermektedir. Burada bağıl yöntemin zaman serilerinin doğrudan elde edildiğini, VADASE ve VA zaman serilerinin ise ilgili tekniklerden elde edilen epoklar arası yer değiştirme değerlerinin entegrasyonu ile türetildiğini ayrıca belirtmek gerekmektedir. Şekilden, bağıl yöntemin uzun periyotlu dalgalanma içermediği ancak VA ve VADASE yöntemlerinde uzun süreli ve düşük frekanslı dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmalar bir önceki alt başlıkta da bahsedildiği gibi ilgili yöntemlerin doğası gereğidir. Ek olarak, 60-30 sn gibi kısa bir zaman dilimi için dinamik yer değiştirme inceleniyorsa bu dalgalanmalar önemsizdir, ancak uzun süreli davranışların önemli olması durumunda ve ayrıca bir doğal afet ya da yük sonucu bir yapıda meydana gelen hasarın detaylı incelenmesi durumunda bu dalgalanmaların ortadan

kaldırılması gerekebilir. Bu nedenle, söz konusu düşük frekanslı dalgalanmaları ortadan kaldırmak amacıyla VA ve VADASE'den türetilen yer değiştirme zaman serileri 5. dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtre kullanılarak filtrelenmiştir. İlgili filtrenin kesme açısı ise 0.25 Hz olarak belirlenmiştir. GNSS tabanlı yaklaşımlar arasında adil bir karşılaştırma gerçekleştirmek amacıyla aynı filtreleme işlemi bağıl yöntemde uygulanmıştır. Filtrelenmiş zaman serileri ise Şekil 8'de görselleştirilmiştir. Filtrelenmiş zaman serileri incelendiğinde, VA ve VADASE zaman serilerindeki dalgalanmaların ortadan kalktığı ve üç zaman serisinin de birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, VA zaman serisinde hala kısa süreli dalgalanmalar olduğu da görülmektedir. Bu davranışların sebebi düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcı ve ANN-MB-00 antenin sahip olduğu gürültü ile doğrudan ilişkilidir.



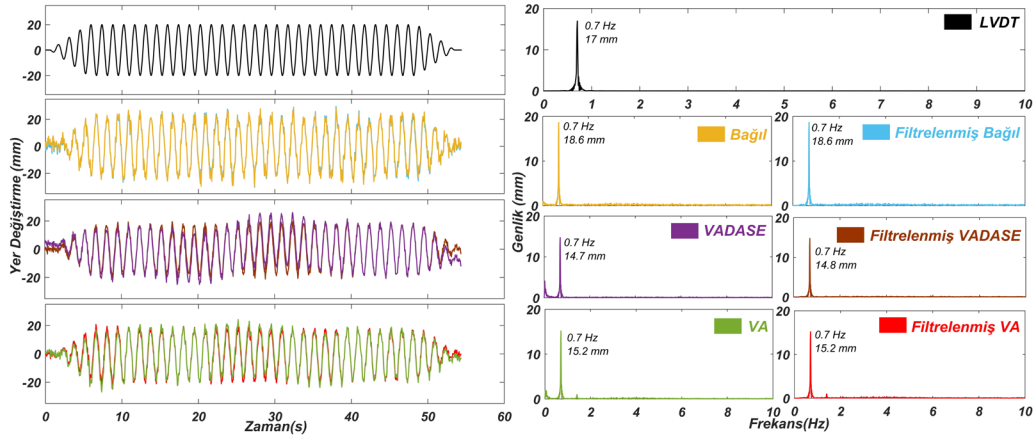
Şekil 7. Yer değiştirme zaman serisi.



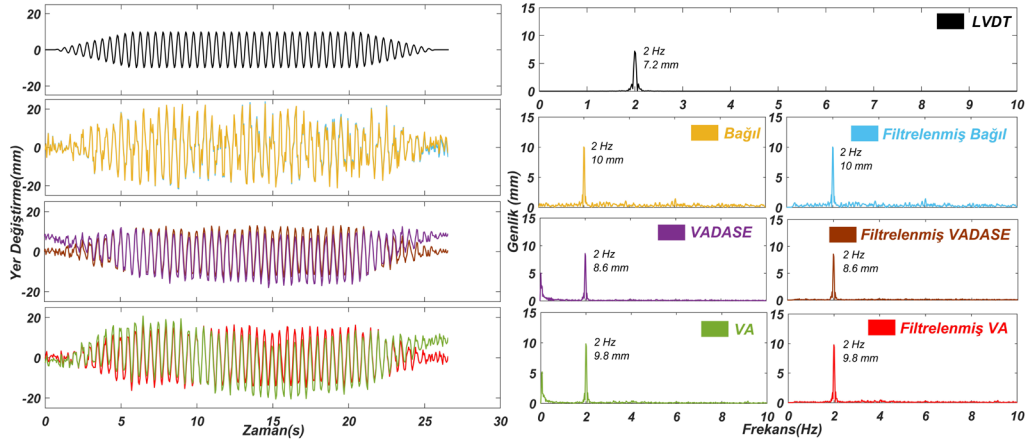
Şekil 8. Filtrelenmiş yer değiştirme zaman serisi.

Yöntemlerin zaman ve frekans alanlarındaki karşılaştırmalarını görsel olarak da değerlendirmek amacıyla çalışma kapsamında planlanan deneylerden iki tanesi örnek olarak seçilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10 sırasıyla 11 ve 17 numaralı deneyler için bağıl yöntem, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen filtrelenmemiş ve filtrelenmiş zaman serileri ve karşılık gelen FFT spektrumlarını göstermektedir. İlgili şekiller incelendiğinde, zaman serilerinin birbirleri ile tutarlı oldukları ve yöntemlerden tespit edilen salınım frekanslarının eşit olduğu görülmektedir. Baskın frekans değerine karşılık gelen genlik değerlerinde ise küçük farklar vardır. Bağıl ve LVDT arasındaki genlik farkları deney 11 için 1.7 mm iken, deney 17 için 2.8 mm'dir. VADASE ve LVDT arasındaki genlik farkları ise deney 11 için 2.3 mm iken, deney 17 için 1.4 mm'dir. Ayrıca, VA ve LVDT arasındaki farklar ise deney 11 için 1.8 mm iken, deney 17 için 2.6 mm'dir. İlgili örnekler incelendiğinde, filtreleme işlemi sonucunda GNSS tabanlı yaklaşımlardan elde edilen baskın frekans değerinin değişmediği açıkça görülmektedir.

Tablo 5, çalışmada tasarlanan tüm deneyler için referans LVDT sensörü ve GNSS tabanlı yöntemlerden FFT analizi ile elde edilen baskın frekans ve karşılık gelen genlik değerlerinin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş sonuçlarını göstermektedir. Tüm deneyler göz önünde bulundurulduğunda, GNSS tabanlı yöntemlerin tüm deneylerin baskın frekans değerini başarılı bir şekilde tespit edebildiği açıktır. Buna ek olarak, karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklılıklar olduğu belirtilmelidir. Bağıl yöntemden elde edilen genlik değerleri ile LVDT'den elde edilenler arasında 0.2 ile 5.6 mm arasında farklar bulunurken, VADASE için bu değerler 0.2 ile 4.1 mm arasında değişmektedir. VA tekniğinin tespit ettiği genlik değerlerinin referans LVDT sensöründen olan farkları ise 0.2 ile 8.2 mm arasında değişmektedir. Bağıl, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen genlik farklarının ortalaması ise sırasıyla 1.7, 1.5 ve 2,2 mm'dir. Filtrelenmiş sonuçlar incelendiğinde ise yöntemlerden elde edilen tepe frekansının tüm deneyler için değişmediği görülmektedir.



Şekil 9. Deney 11 yer değiştirme zaman serisi ve FFT sonuçları.



Şekil 10. Deney 17 yer değiştirme zaman serisi ve FFT sonuçları.

Bu duruma ilaveten, tepe frekansına karşılık gelen genlik değerlerinde de dramatik bir değişim olmadığı ancak bazı deneylerde GNSS tabanlı yöntemlerden elde edilen genlik değerinin kısmen LVDT'ye yaklaştığı göze çarpmaktadır. Bu bulgular frekans alanında tepe frekansa karşılık gelen genlik değerlerinin yakalanması filtreleme işleminin sonuçlara az da olsa olumlu şekilde etki ettiğini göstermektedir. Frekans alanında elde edilen bu sonuçlar ise genel olarak düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin yüksek maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğine oldukça güçlü bir alternatif olduğuna ve düşük maliyetli GNSS alıcı ve antenleri ile bir yapının doğal frekans değerinin başarılı bir şekilde tespit edilebileceğine açıkça işaret etmektedir.

GNSS tabanlı yöntemlerin kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğini daha da derinlemesine incelemek ve tartışmak için, referans LVDT sensöründen elde edilen yer değiştirme değerleri ile GNSS tabanlı tekniklerden

elde edilen değerler arasındaki farkların istatistikleri de elde edilmiştir. Tablo 6, çalışma kapsamında tartışılan yöntemler ile LVDT arasındaki farkların maksimum hata ve KOH değerlerini özetlerken, Şekil 11 filtrelenmiş ve filtrelenmemiş bağıl, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen KOH değerlerini görselleştirmektedir. Tablo ve şekilden, bağıl yöntem için KOH değerlerinin 2.7 ile 6.8 mm arasında değiştiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, VADASE yönteminden elde edilen KOH değerleri 1.8 ile 12.5 mm arasında değişirken bu değerler VA yaklaşımı için 2.4 ile 14.5 mm arasında değişmektedir. VADASE ve VA arasındaki KOH değerleri karşılaştırıldığında VADASE yaklaşımının VA yöntemine kıyasla kısa süreli dinamik davranışları kısmen daha hassas bir şekilde tespit edebildiği görülmektedir. Bu durum, deneylerde kullanılan Leica GR30 alıcı ve AS11 anteni ile u-blox ZED-F9P alıcı ve ANN-MN-00 antenlerinin sahip olduğu gürültü seviyesi ile doğrudan ilişkilidir.

Tablo 5. Yer değiştirme alanı için deneylerin numaraları (DN), frekans ve genlik değerleri.

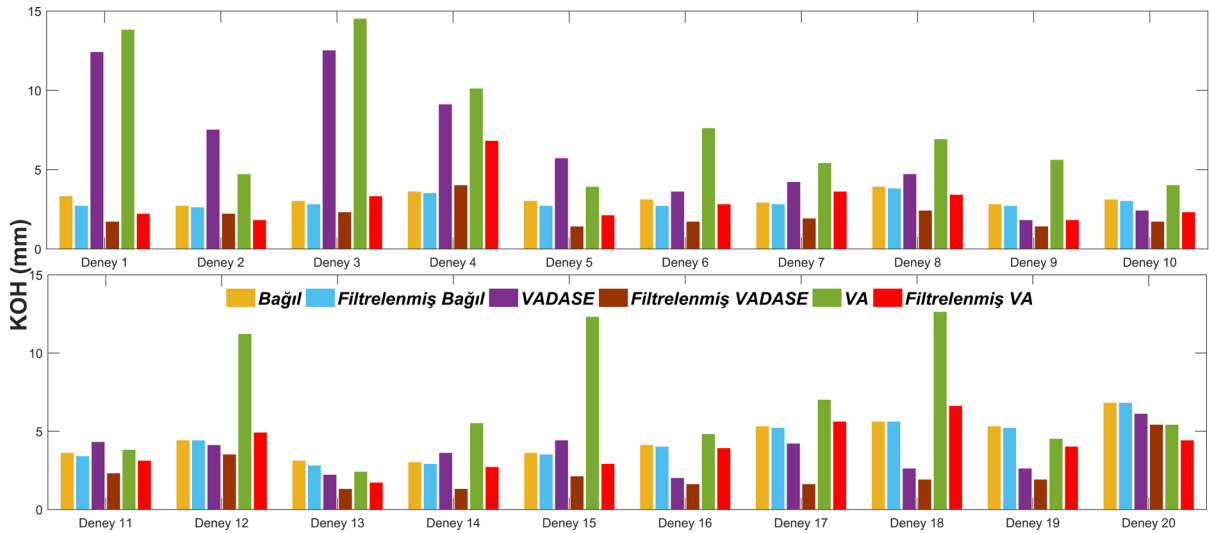
DN	LVDT				BAĞIL				VADASE				VA			
	Frekans (Hz)		Genlik (mm)		Frekans (Hz)		Genlik (mm)		Frekans (Hz)		Genlik (mm)		Frekans (Hz)		Genlik (mm)	
	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.
1	0.3	0.3	4.3	4.3	0.3	0.3	4.8	4.6	0.3	0.3	3.2	3.1	0.3	0.3	2.6	2.5
2	0.3	0.3	8.6	8.6	0.3	0.3	9.1	8.8	0.3	0.3	6.7	6.4	0.3	0.3	8.8	8.6
3	0.3	0.3	17.3	17.3	0.3	0.3	18.3	17.7	0.3	0.3	16.3	15.5	0.3	0.3	20.8	20.0
4	0.3	0.3	25.9	25.9	0.3	0.3	24.9	24.1	0.3	0.3	22.4	21.8	0.3	0.3	34.1	33.1
5	0.5	0.5	4.4	4.4	0.5	0.5	4.2	4.2	0.5	0.5	3.8	3.8	0.5	0.5	5.7	5.7
6	0.5	0.5	8.8	8.8	0.5	0.5	8.3	8.3	0.5	0.5	7.5	7.5	0.5	0.5	9.2	9.1
7	0.5	0.5	17.7	17.7	0.5	0.5	18.1	18.1	0.5	0.5	16.3	16.3	0.5	0.5	14.8	14.9
8	0.5	0.5	26.5	26.5	0.5	0.5	29.1	29.1	0.5	0.5	25.4	25.3	0.5	0.5	25.7	25.6
9	0.7	0.7	4.2	4.2	0.7	0.7	4.7	4.7	0.7	0.7	4.0	3.7	0.7	0.7	3.1	3.1
10	0.7	0.7	8.5	8.5	0.7	0.7	9.6	9.6	0.7	0.7	7.1	7.1	0.7	0.7	7.0	7.0
11	0.7	0.7	16.9	16.9	0.7	0.7	18.6	18.6	0.7	0.7	14.7	14.8	0.7	0.7	15.2	15.2
12	0.7	0.7	25.4	25.4	0.7	0.7	28.3	28.3	0.7	0.7	22.9	22.9	0.7	0.7	21.2	21.4
13	1.0	1.0	4.1	4.1	1.0	1.0	4.8	4.8	1.0	1.0	3.6	3.6	1.0	1.0	2.9	2.9
14	1.0	1.0	8.2	8.2	1.0	1.0	9.5	9.5	1.0	1.0	7.3	7.4	1.0	1.0	7.2	7.3
15	1.0	1.0	12.2	12.2	1.0	1.0	14.8	14.7	1.0	1.0	11.0	10.9	1.0	1.0	11.5	11.4
16	2.0	2.0	3.6	3.6	2.0	2.0	6.6	6.6	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0	2.0	4.9	4.8
17	2.0	2.0	7.2	7.2	2.0	2.0	10.0	10.0	2.0	2.0	8.6	8.6	2.0	2.0	9.8	9.8
18	2.0	2.0	10.8	10.8	2.0	2.0	13.3	13.3	2.0	2.0	12.6	11.9	2.0	2.0	13.8	14.0
19	3.0	3.0	3.4	3.4	3.0	3.0	6.3	6.3	3.0	3.0	5.1	5.1	3.0	3.0	5.6	5.7
20	3.0	3.0	6.8	6.8	3.0	3.0	12.4	12.3	3.0	3.0	10.9	10.9	3.0	3.0	10.5	10.5

Tablodan yine, GNSS tabanlı yöntemlerin filtrelenmiş sonuçları için LVDT sensörü arasındaki farklardan elde edilen maksimum hata ve KOH değerleri de görülmektedir. Filtreleme sonucunda elde edilen KOH değerleri incelendiğinde ise GNSS tabanlı yöntemlerin tümünde iyileşme olduğu açıktır. Filtreleme işlemi sonrasında VADASE tekniğinden elde edilen KOH değerleri ortalama olarak %55.9 oranında

iyileşirken, VA tekniğinden elde edilen KOH değerleri ortalama %52.0 oranında iyileşmiştir. Bu bulgular filtreleme işleminin başarısını açıkça gösterirken, gerçek zamanlı YSİ ve doğal afet erken uyarı sistemlerinde düşük maliyetli GNSS anten/alıcılarının ve VA tekniğinin destekleyici bir sensör ve algoritma olarak kullanılabilmesine ve ayrıca gerçek zamanlı uygun bir filtreleme işleminin önemine işaret etmektedir.

Tablo 6. Yer değiştirme alanı için deneylerin KOH ve maksimum değerleri.

Deney No	BAĞIL				VADASE				VA			
	Maks. (mm)		KOH (mm)		Maks. (mm)		KOH (mm)		Maks. (mm)		KOH (mm)	
	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.	Ham	Fil.
1	17.0	17.3	3.3	2.7	23.6	5.9	12.4	1.7	33.3	6.6	13.8	2.2
2	11.4	10.7	2.7	2.6	18.5	7.0	7.5	2.2	13.1	8.3	4.7	1.8
3	11.3	12.9	3.0	2.8	32.6	9.9	12.5	2.3	34.3	11.7	14.5	3.3
4	15.4	14.2	3.6	3.5	25.8	14.0	9.1	4.0	33.2	17.8	10.1	6.8
5	10.6	8.8	3.0	2.7	14.7	4.5	5.7	1.4	11.4	6.9	3.9	2.1
6	12.1	10.2	3.1	2.7	14.1	6.9	3.6	1.7	25.6	17.7	7.6	2.8
7	10.9	11.1	2.9	2.8	14.3	7.1	4.2	1.9	18.9	10.9	5.4	3.6
8	14.5	14.4	3.9	3.8	16.4	8.6	4.7	2.4	20.8	11.4	6.9	3.4
9	12.6	12.4	2.8	2.7	7.3	4.6	1.8	1.4	14.7	5.3	5.6	1.8
10	10.5	9.7	3.1	3.0	7.5	5.4	2.4	1.7	11.6	6.5	4.0	2.3
11	12.5	11.4	3.6	3.4	12.8	7.7	4.3	2.3	11.9	9.2	3.8	3.1
12	14.1	13.7	4.4	4.4	12.4	11.0	4.1	3.5	37.4	25.7	11.2	4.9
13	14.6	13.9	3.1	2.8	7.2	4.2	2.2	1.3	8.9	5.6	2.4	1.7
14	9.6	9.1	3.0	2.9	10.1	4.4	3.6	1.3	16.7	13.9	5.5	2.7
15	10.9	10.6	3.6	3.5	9.8	5.3	4.4	2.1	33.7	15.8	12.3	2.9
16	11.9	12.1	4.1	4.0	6.9	4.7	2.0	1.6	12.5	8.7	4.8	3.9
17	14.9	15.6	5.3	5.2	9.7	4.7	4.2	1.6	17.3	12.7	7.0	5.6
18	18.8	17.9	5.6	5.6	7.4	5.5	2.6	1.9	30.2	14.7	12.7	6.6
19	17.5	17.2	5.3	5.2	7.7	4.8	2.6	1.9	13.1	11.4	4.5	4.0
20	20.5	20.7	6.8	6.8	15.4	12.0	6.1	5.4	16.4	13.9	5.4	4.4



Şekil 11. Yer değiştirme alanı için deneylerden elde edilen KOH değerleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada düşük maliyetli tek frekanslı GNSS alıcısı ve anteninden elde edilen çoklu GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği, yüksek maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilen VADASE ve bağıl konum belirleme yöntemleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. GNSS yöntemlerinin dinamik davranışları yakalayabilme performanslarını incelemek için farklı frekans ve genliklere sahip düşey yönlü dinamik hareketler simüle edilmiş ve yöntemlerden elde edilen epoklar arası yer

değiştirme ve yer değiştirme sonuçları LVDT sensörü verileri referans alınarak zaman ve frekans alanında detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Epoklar arası yer değiştirme ve yer değiştirme alanında elde edilen bulgular dikkate alındığında, kullanılan alıcı/anten tipinden ve değerlendirme yöntemlerinden bağımsız olarak, çalışma kapsamında değerlendirilen tüm GNSS tabanlı yöntemlerin simüle edilen dinamik davranışların baskın frekans değerlerini başarılı bir şekilde tespit edebildiği son derece açıktır. Buna ek olarak, alıcı/anten ve değerlendirme tekniklerinden kaynaklı olarak, tepe frekansına

karşılık gelen genlik değerlerinde mm mertebesinde farklılıklar meydana gelmiştir.

Zaman alanında yapılan incelemeler sonucunda, yer değiştirme zaman serileri göz önüne alındığında yüksek maliyetli VADASE ve düşük maliyetli VA yöntemlerinin dinamik davranışları bağıl yöntem gibi başarılı bir şekilde yakaladığı fakat uzun dönemli zaman serilerinde ilgili tekniklerin yapısı gereği uzun periyotlu dalgalanmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu dalgalanmalar ise yüksek geçirgenli filtre uygulanarak ortadan kaldırılmıştır. Filtreleme uygulamadan önce bağıl yöntem, VADASE ve VA yöntemlerinden daha düşük KOH değerlerine sahipken, filtreleme sonrası VADASE yöntemi bağıl yöntemden mm seviyelerinde bir farkla daha düşük KOH değerlerine sahip olmuştur. Filtreleme sonrası VA yöntemi VADASE ve bağıl yöntemle yaklaşmıştır, hatta VA tekniği 1.0 Hz, 2.0 Hz ve 3.0 Hz gibi yüksek frekanslı hareketlerinin bir kısmında mm seviyesinde farklarla bağıl yöntemle göre daha düşük KOH değerlerine sahip olmuştur. Epoklar arası yer değiştirme alanında elde edilen KOH değerleri dikkate alındığında ise, VADASE yaklaşımı VA tekniğinden, VA yöntemi ise bağıl yöntemden mm seviyelerinde daha küçük KOH değerlerine sahiptir. Bu, VADASE ve VA yöntemlerinde tek GNSS alıcısı verileri kullandığı için daha düşük gürültüye sahip olması ile doğrudan ilişkilidir.

Son olarak, çalışmadan elde edilen bulgular YSİ sistemlerinde düşük maliyetli GNSS alıcılarının ve buradan elde edilen gözlemlere dayalı VA tekniğinin çeşitli geoteknik sensörleri destekleyici harici bir sensör olarak kullanılabilmesini açıkça göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ARDEB 1001 [Proje No: 122Y100] programına teşekkür eder. PPPH-VA açık kaynak kodlu yazılıma "<https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/ppph-va.shtml>" bağlantısından ulaşılabilir.


ORCID


Mert BEZCİOĞLU 
<https://orcid.org/0000-0001-7179-8361>

Berkay BAHADUR 
<https://orcid.org/0000-0003-3169-8862>

Emre BOZDOĞAN 
<https://orcid.org/0009-0006-9862-3039>

Ahmet Anıl DİNDAR 
<https://orcid.org/0000-0003-3168-8322>

Burak AKPINAR 
<https://orcid.org/0000-0002-3076-1578>

Metin NOHUTCU 
<https://orcid.org/0000-0001-9582-582X>

Cemal Özer YİĞİT 
<https://orcid.org/0000-0002-1942-7667>

KAYNAKLAR

- Bahadur, B., Bezcioglu, M., ve Yigit, C. O. (2024a). PPPH-VA: an open-source software for real-time multi-GNSS variometric approach using single-and dual-frequency observations. *GPS Solutions*, 28(1), 31. doi: 10.1007/s10291-023-01560-z
- Bahadur, B., Bezcioglu, M., ve Yigit, C. O. (2024b). Evaluation of the single-frequency variometric approach based on low-cost GNSS observations and different satellite combinations for detecting short-term dynamic behaviors. *Measurement Science and Technology*, 35(8), 086317. doi: 10.1088/1361-6501/ad48a1
- Bezcioglu, M., Yigit, C. O., Mazzoni, A., Fortunato, M., Dindar, A. A., ve Karadeniz, B. (2022a). High-rate (20 Hz) single-frequency GPS/GALILEO variometric approach for real-time structural health monitoring and rapid risk assessment. *Advances in Space Research*, 70(5), 1388-1405. doi: 10.1016/j.asr.2022.05.074
- Bezcioglu, M. (2023). Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı gerçek-zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) tekniğinin performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1341-1350. doi: 10.28948/ngumuh.1310577

- Bezciöğlu, M., Karadeniz, B., Yiğit, C. Ö., Dindar, A. A., Bezir, F., ve Avcı, Ö. (2022b). Gerçek Zamanlı GNSS VADASE yaklaşımının dinamik deplasmanları yakalayabilme kabiliyetinin incelenmesi. *Harita Dergisi*, 167, 1-11. <https://www.harita.gov.tr/uploads/files/articles/gercek-zamanli-gnss-vadase-yaklasiminin-dinamik-deplasmanlari-yakalayabilme-kabiliyetinin-in-1587.pdf>
- Boehm, J., ve Schuh, H. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1). doi: 10.1029/2003GL018984
- Colosimo, G., Crespi, M. ve Mazzoni, A. (2011). Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 116, B11302. doi: 10.1029/2010JB007941
- Farrar, C.R. ve Worden K. (2012). Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective, John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118443118
- Fortunato, M., Ravanelli, M. ve Mazzoni, A. (2019). Real-Time Geophysical Applications with Android GNSS Raw Measurements. *Remote Sensing*, 11, 2113. doi: 10.3390/rs11182113
- Geng, T., Xie, X., Fang, R., Su, X., Zhao, Q., Liu, G., Li, H., Shi, C. ve Liu, J. (2016). Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw7.8 Nepal earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43,161–167. doi: 10.1002/2015GL067044
- Gikas, V. (2012). Ambient vibration monitoring of slender structures by microwave interferometer remote sensing. *Journal of Applied Geodesy*, 6, 167–176. doi: 10.1515/jag-2012-0029
- Ju, B., Jiang, W., Tao, J., Hu, J., Xi, R., Ma, J., ve Liu, J. (2022). Performance evaluation of GNSS kinematic PPP and PPP-IAR in structural health monitoring of bridge: Case studies. *Measurement*, 203, 112011. doi: 10.1016/j.measurement.2022.112011
- Kaloop, M. R. ve Li, H. (2014). Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement*, 47 (1), 531–539. doi: 10.1016/j.measurement.2013.09.046
- Kaloop, M.R., Yigit, C.O., Dindar, A.A., Elshawary, M. ve Hu, J.W. (2020). Evaluation of the high-rate GNSS-PPP method for vertical structural motion. *Survey Review*, 52(371),159-171. doi: 10.1080/00396265.2018.1534362
- Karadeniz, B., Bezciöğlu, M., Yiğit, C. Ö., Dindar, A. A., ve Avcı, Ö. (2022). Gerçek-Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Düşey Yönlü Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 626-636. doi: 10.35414/akufemubid.1066489
- Kouba, J. (2015). A guide to using International GNSS Service (IGS) products. https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., ve Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1069-1073. doi: 10.1002/grl.50288
- Landskron, D., Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360. doi: 10.1007/s00190-017-1066-2
- Moschas, F. ve Stiros, S.C. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, *Eng. Struct.*, 33 (1), 10-17. doi: 10.1016/j.engstruct.2010.09.013
- Oku Topal, G., Karabulut, M. F., Aykut, N. O., ve Akpınar, B. (2023). Performance of low-cost GNSS equipment in monitoring of horizontal displacements. *Survey Review*, 55(393), 536-545. doi: 10.1080/00396265.2023.2179910
- Petit, G. ve Luzum, B. (2010). IERS Conventions 2010 IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des *Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*,179 pp., ISBN 3-89888-989-6. <https://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf>
- Qu, X., Shu, B., Ding, X., Lu, Y., Li, G., ve Wang, L. (2022). Experimental study of accuracy of high-rate GNSS in context of structural health monitoring. *Remote Sensing*, 14(19), 4989. doi: 10.3390/rs14194989

- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, *The use of Artificial Satellites for Geodesy* (Geophysical Monograph Series), 15(1972), 247-251. doi: 10.1029/GM015p0247
- Tesolin, F., Vitti, A., Mazzoni, A. ve Crespi, M. (2019). Impact of Galileo data on the solutions of the variometric approach for displacement analysis. *Advances in Space Research*, 63(9), 3053-3061. doi: 10.1016/j.asr.2019.01.048
- Wang, X., Zhao, Q., Xi, R., Li, C., ve Li, G. (2021). Review of bridge structural health monitoring based on GNSS: From displacement monitoring to dynamic characteristic identification. *IEEE Access*, 9, 80043-80065. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083749
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W. ve Liechten, S. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 18(2) 91–98.
- Xi, R., He, Q. ve Meng, X. (2020). Bridge monitoring multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*, 168, 108303. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108303
- Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q., ve Yanagidani, T. (2013). High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units. *Journal of geodesy*, 87, 361-372. doi: 10.1007/s00190-012-0606-z
- Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Anil Dindar, A., Bezcioglu, M., ve Tiryakioglu, I. (2021). Investigating performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: Dynamic tests on shake table. *Journal Of Surveying Engineering*, 147(1), 05020011. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000343
- Yigit, C.O. (2016). Experimental assessment of post processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7, 363-380. doi: 10.1080/19475705.2014.917724
- Yigit, C.O. ve Gurlek, E. (2017). 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*, 8(2), 893-904. doi: 10.1080/19475705.2017.1284160
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., ve 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. doi: 10.1029/96JB03860